

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta stavební**



**Technické aspekty regenerace brownfields**

Technical aspects of brownfield regeneration

*Disertační práce*

<b>Autor:</b>	Ing. Barbora Macečková
<b>Školitel:</b>	doc. Ing. Barbara Vojvodíková, Ph. D.
<b>Studijní program:</b>	P3607 Stavební inženýrství
<b>Obor:</b>	3607V012 Městské inženýrství a stavitelství

Ostrava 2015

### **Čestné prohlášení**

„Prohlašuji, že jsem celou disertační práci včetně příloh vypracovala samostatně, podle pokynů školitele disertační práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.“

V Ostravě, dne 29. června 2015

## Poděkování

Ráda bych poděkovala své školitelce doc. Ing. Barbaře Vojvodíkové, Ph. D. za odborné, zároveň přátelské, a trpělivé vedení nejen během zpracování mé disertační práce, ale i po celou dobu mého doktorského studia. Velké díky patří Mgr. Oldřichu Motykovi, Ph. D. za jeho odborné konzultace a přátelskou podporu. Děkuji své rodině, zvláště matce a otci, dále nejbližším přátelům, za jejich neustálou podporu během občas obtížných fází mého studia.

Nelze opominout společnosti a instituce, bez kterých by se tato práce nestala takto hodnotou. Děkuji společnosti AGRITEC, s. r. o. jedna za spolehlivou spolupráci během praktické části mé disertační práce a jednak za provedení chemické analýzy, zejména pak Mgr. Marii Bjelkové, Ph. D. Nelze opomenout laboratorní tým Centra nanotechnologií VŠB – TU Ostrava, který provedl analytická měření, kterému rovněž děkuji.

Disertační práce, zejména její praktická část, by nevznikla bez finanční podpory následujících projektů:

*SP2015/45 Příprava a vlastnosti sorbentů.*

*Nové kreativní týmy v prioritách vědeckého bádání, reg. č. CZ.1.07/2.3.00/30.0055 podpořeného Operačním programem Vzdělávání pro konkurenceschopnost a spolufinancovaného Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.*

*TA04010331 - Charakterizace a selekce C. sativa po potravinářské i nepotravinářské využití pomocí biotechnologických postupů a vysokokapacitních metod. (2014-2017, TA0/TA).*

Za finanční podporu děkuji.

## Anotace

Technická regenerace brownfields zahrnuje nejen sanace stávajících budov, ale i řešení problémů týkajících se znečištění těchto lokalit. Odstranění kontaminantů z území by mělo být prioritou zejména kvůli potenciálnímu ohrožení lidského zdraví a kvality životního prostředí. Výběr vhodné sanační technologie pro odstranění přítomného znečištění je součástí úspěšného řešení technické regenerace brownfields.

Disertační práce je zaměřena na ověření výchozí hypotézy posouzení možnosti využití sanační technologie fytoextrakce, resp. fytoextrakce pro odstranění toxických prvků, resp. toxických kovů z půdy pomocí technického konopí (*Cannabis sativa* L.). Tato metoda je založena na principu využití zelených rostlin, které jsou schopny, do svých vnitřních struktur, akumulovat toxické prvky. Jedná se o metodu s nízkými ekonomickými náklady, technicky nenáročnou a šetrnou k životnímu prostředí. Technické konopí bylo vybráno pro jeho základní předpoklady využití k tomuto účelu, za ty nejdůležitější lze vyjmenovat například: technické konopí je plodinou, pro Českou republiku původní, u které je kompletně zvládnuta agrotechnika; je schopna akumulovat toxické prvky z kontaminované půdy; disponuje vysokou produkcí biomasy, což podporuje i druhotné využití vypěstovaného materiálu - i přesto, že je kontaminovaný - například v energetickém průmyslu.

Postup při posuzování základní hypotézy lze definovat následovně. V první fázi byl vybrán druh zeminy – odebraný z průmyslového brownfields – na kterém byla ověřena schopnost růstu vybrané plodiny technického konopí. Aplikace technologie fytoextrakce *in situ* byla stěžejní náplní druhé fáze praktické části disertační práce. Analytická měření, která následovala ve třetí fázi ověřování výchozí hypotézy, měla dva cíle. Prvním z nich bylo podrobné hodnocení odebrané zeminy. Chemická analýza zeminy podrobně popsala její chemické vlastnosti, míru jejího znečištění a také prvky, které jsou v této zemině dostupné pro rostliny. Druhým cílem byla analýza rostlinného materiálu. Tato analýza měla kvalitativní a kvantitativní charakter. První kvalitativní analýza prokázala přítomnost několika prvků, které jsou pokládány za toxické, případně za ty, které nejsou běžnými pro rostlinnou buněčnou strukturu. Za tyto prvky jsou považovány: baryum, zinek, měď, olovo, kadmium, titan, hliník a tantal. Kvantitativní chemický rozbor vypěstovaných rostlin nejen potvrdil přítomnost, ale především určil obsah následujících prvků: zinku, mědi, kadmia a olova.

Na základě vyhodnocení naměřených dat lze konstatovat, že výchozí hypotézu lze potvrdit. Technologii fytoextrakce toxických prvků z půdního prostředí pomocí technického konopí (*Cannabis sativa* L.) lze v tomto konkrétním případě vyhodnotit jako úspěšnou.

**Klíčová slova:** brownfields, technická regenerace, kontaminace, toxické kovy, fytoextrakce, technické konopí

## Annotation

Technical regeneration of brownfields consists not only of building remediation but also of solving potential contamination on these sites. The elimination of pollutants from brownfields should be a priority in order to protect human health and support the quality of environment. The choice of the appropriate remediation method is part of the successful technical regeneration of brownfields.

The present dissertation thesis is focused on the verification of the following hypotheses: “Verification of the possible usage of remediation technology phytoextraction of toxic metals from soils by using technical hemp (*Cannabis sativa* L.)”. Phytoextraction refers to uptake of contaminants from soil or water by plant roots and their translocation to any harvestable plant part. Phytoextraction is cost-effective method; application of this method doesn't require any difficult technical support and is ecological friendly. Technical hemp has several advantages as: plant is originally from Czech Republic, its agro -technology is completely known, technical hemp is able to accumulate toxic elements from soil, and it is high biomass plant.

To verify the initial hypotheses basic steps should be given. In the first phase concrete type of the soil – sampled in industrial brownfield – was chosen according to the hemp ability to grow on. The crucial step - application of the phytoextraction technology *in situ* was done in the second phase. The third part consisted of two types of analysis. The first one was to analyze the sampled soil to obtain its chemical properties and determination of bioavailable elements in the soil to be accumulated by the plant. The second analysis was focused on the plants which were grown on the contaminated soil. The aim of this analysis was: first to detect elements in the plant tissues by qualitative method and second to determine concrete concentration of those elements in whole plant *C. sativa* L. The result from the first qualitative analysis shows that *C. sativa* was able to accumulate some elements which are conventionally considered as toxic metals: barium, zinc, copper, cadmium and lead. And also others which are not naturally in plant issues: titanium, tantalum, and aluminum. Quantitative analysis also determined certain concentration of the following elements: zinc, copper, cadmium and lead.

According to the all gained results, it can be concluded that the initial hypothesis: „Using the technology phytoextraction of the toxic metals from soil using technical hemp (*Cannabis sativa* L.)“ has been verified.

**Key words:** brownfields, technical regeneration, contamination, toxic metals, phytoextraction, technical hemp

## Obsah

1	Úvod.....	8
2	Cíle disertační práce .....	11
3	Postup a metody zpracování disertační práce .....	12
3.1	Předběžný laboratorní experiment.....	12
3.2	Aplikace technologie fytoextrakce in situ .....	12
3.3	Analýza rostlinného materiálu, odebrané zeminy a vyhodnocení naměřených výsledků.....	13
4	Teoretická východiska .....	14
4.1	Definice brownfields a jejich kategorizace .....	14
4.1.1	Definice podle Concerted Action on Brownfield and Economic Regeneration Network (CABERNET) .....	14
4.1.2	Definice podle US Environmental Protection Agency .....	15
4.2	Typy a kategorizace brownfields.....	15
4.2.1	Typizace brownfields podle původu .....	15
4.2.2	Kategorizace brownfields podle potenciálního využití území .....	20
5	Regenerace brownfields.....	22
5.1	Sanační technologie .....	22
5.2	Často používané dekontaminační technologie v ČR .....	24
6	Využití technologie fytoremediace při řešení technických aspektů regenerace brownfields .....	28
7	Fytoextrakce toxických prvků z půd .....	33
7.1	Mechanismus fytoextrakce toxických prvků z půd .....	33
7.2	Hyperakumulující rostliny .....	34
7.3	Nehyperakumulující rostliny .....	36
7.4	Potenciál technického konopí pro fytoextrakci .....	37

7.4.1	Akumulace a distribuce toxických prvků v rostlině technického konopí ( <i>Cannabis sativa</i> L.).....	40
7.5	Vysvětlení obvyklých látek sledovaných v technickém konopí.....	42
8	Aplikace metody fytoextrakce.....	45
8.1	Předběžný laboratorní experiment.....	45
8.2	Použití metody fytoextrakce in situ .....	50
9	Analýza zeminy .....	53
9.1	Hodnocení nebezpečnosti zeminy z pohledu Vyhlášky č. 294/2005 Sb. ....	54
9.2	Hodnocení znečištění zeminy podle Metodického pokynu – Kritéria znečištění zemín a podzemní vody z roku 1996.....	59
9.3	Biodostupnost prvků v půdě pro rostliny.....	62
10	Analýza rostlinného materiálu.....	65
10.1	Skenovací elektronová mikroskopie a energo - disperzní mikroanalýza (EDX) .....	66
10.1.1	Kořen.....	67
10.1.2	Stonek .....	72
10.1.3	Semeno .....	79
10.1.4	List .....	82
10.2	Chemická analýza rostlinného materiálu .....	89
11	Závěr .....	91
	Literatura .....	96
	Vlastní publikace doktorandky .....	102
	Seznam tabulek.....	104
	Seznam obrázků.....	105
	Seznam zkratk a značek.....	106

## 1 Úvod

Problematika regenerace brownfields je značně obsáhlá a v současné době se jí zabývá řada odborníků z různých odvětví. Společným znakem většiny výzkumů je nalezení vhodné metody vedoucí k efektivní regeneraci brownfields. Jedním z mnoha přístupů je řešení technických aspektů těchto území. Technická regenerace brownfields zahrnuje nejen například sanace stávajících budov, ale i řešení environmentálních problémů. Rizika spojená s potenciální nebo zjištěnou kontaminací území mohou být jedním z omezujících faktorů budoucího rozvoje brownfields. Odstranění znečišťujících látek z území by mělo být prioritou zejména kvůli možnému ohrožení lidského zdraví a kvality životního prostředí. Výběr vhodné dekontaminační metody je součástí úspěšného řešení technické regenerace brownfields. Tento výběr je úzce spojen s druhem a typem znečištění nacházející se na dané lokalitě.

Disertační práce je zaměřena na zjištění možnosti odstranění půdního znečištění - anorganické povahy - z průmyslového brownfields. Pro praktickou aplikaci dekontaminační metody byla vybrána technologie označovaná jako fytoremediace. Principem této metody je využití rostlin pro jejich schopnost akumulovat anorganické polutanty kořenovým systémem a následně tyto látky zabudovat do svých vnitřních struktur. Tato metoda disponuje řadou výhod, ze kterých lze vyjmenovat například: nízké ekonomické náklady na její aplikaci, technickou nenáročnost a šetrnost k životnímu prostředí. Výběr rostliny je jedním z klíčových faktorů pro úspěšnou aplikaci této technologie. Pro výzkum disertační práce byla vybrána plodina technického konopí (*Cannabis sativa* L.). Jedny z mála výhod použití této rostliny jsou následující: schopnost akumulovat toxické prvky z půdy; vysoká produkce biomasy; v ČR původní rostlina. Potenciál této metody spočívá především v nízkých provozních nákladech, šetrnosti k životnímu prostředí a také například pro možnost druhotného využití vzniklé biomasy. Tuto metodu lze také považovat za velmi významnou při řešení dočasného využití brownfields, který disponuje environmentální zátěží, ale prozatím pro něj není stanoven postup jeho budoucí regenerace. Aplikací technologie fytoremediace lze na brownfields,



na kterém je prokázána kontaminace, nastartovat proces dekontaminace tohoto území. Další výhodou může být zlepšení vnímání lokality veřejností pro její ozelenění.

Cíle disertační práce jsou blíže stanoveny a podrobně popsány v druhé kapitole. Postup činností a metody, které byly pro splnění stanovených cílů závěrečné práce použity, jsou uvedeny ve třetí kapitole.

Pojem brownfields není jednotně definován. Proto je tento pojem vymezen v úvodu čtvrté kapitoly. Pro lepší pochopení výkladu definice brownfields, jsou v této kapitole také uvedeny dva nejčastěji používané přístupy k této problematice, tj. běžně používaný evropský a legislativně ukotvený přístup US EPA. Dále kapitola popisuje dvě základní členění brownfields. Prvním z nich je jeho typizace na základě předchozího využití území. Druhé členění brownfields spočívá v rozdělení těchto ploch na základě jejich potenciálu pro budoucí rozvoj.

Vzhledem k povaze předchozího využití území, mohou být současné brownfields kontaminovány znečišťujícími látkami různé povahy. Pro zabránění či omezení ohrožení lidského zdraví a životního prostředí je nutné tuto kontaminaci odstranit. Regenerace brownfields zahrnuje sanaci území pomocí použití vhodné sanační technologie. Tato problematika je společně s přehledem často používaných metod pro odstraňování znečištění uvedena v páté kapitole.

Principem technologie fyto remediac je využití rostlin pro odstranění kontaminantů z půdního prostředí. Tato dekontaminační metoda byla pro praktickou část disertační práce vybrána pro její potenciál při uplatnění technické regenerace brownfields. Hlavní výhody této technologie spočívají v dočasném řešení brownfields, pro který prozatím není z nějakého důvodu možné vypracovat plán jeho budoucího využití a současně může být vhodným začátkem pro navazující dekontaminační postupy. Podrobnější vysvětlení výchozích principů této metody společně se specifiky jejího využití je popsáno v šesté kapitole.

Fytoextrakce je jedním z nejrozšířenějších mechanismů technologie fyto remediac. V sedmé kapitole je uvedeno shrnutí potenciálu této metody pro dekontaminaci půd. V této části jsou uvedeny konkrétní příklady využití této

technologie pro odstraňování toxických kovů z půd za pomoci využití zelených rostlin – konkrétně technického konopí. Jednou z podkapitol tvoří přehled rostlin, které se pro fytoextrakci toxických prvků z půd běžně používají a jsou zde popsány jejich základní znaky. V poslední podkapitole je uveden důvod použití technického konopí spolu z pohledu využití jeho potenciálu pro účel fytoextrakce. Součástí je popis obvykle diskutovaných látek vyskytujících se v technickém konopí.

Aplikace technologie fytoextrakce toxických prvků z půd pomocí technického konopí (*Cannabis sativa* L.) je nosnou kapitolou celé disertační práce. Součástí osmé kapitoly je popis předběžného laboratorního pokusu. Jehož cílem bylo ověřit schopnost růstu technického konopí na jednom ze dvou druhů odebrané zeminy. Druhá podkapitola podrobně popisuje založení cílového experimentu *in situ*. Cílem tohoto výzkumu bylo ověřit schopnost technického konopí akumulovat toxické prvky z reálně kontaminované zeminy odebrané z průmyslového brownfields.

Pro získání informací o chemických vlastnostech zeminy odebrané z průmyslového brownfieldu, byla provedena řada analytických měření. Hodnocení této zeminy se týkalo jednak stanovení nebezpečnosti v případě jejího ukládání na skládku odpadů a jednak určení míry znečištění této zeminy. Další analýza měla určit ty prvky, které jsou v zemině biodostupné pro rostliny, tzn. stanovení prvků, které je rostlina v dané formě schopna akumulovat. Výsledky těchto měření jsou uvedeny v deváté kapitole disertační práce.

Pro ověření schopnosti technického konopí akumulovat toxické prvky z půdy byly provedeny analýzy vypěstovaného rostlinného materiálu. Nejprve byla provedena kvalitativní analýza pomocí elektronové mikroskopie a mikroanalýzy EDX. Druhá analýza měla kvantitativní charakter a chemickým rozbohem stanovila množství akumulovaných prvků v rostlině. Cílem kvantitativní analýzy bylo také ověření přítomnosti prvků v rostlině, které byly detekovány předchozí kvalitativní analýzou. Naměřené výsledky spolu s jejich vyhodnocením jsou popsány v desáté kapitole.

## 2 Cíle disertační práce

Cílem disertační práce je ověření výchozí hypotézy: „Ověření možnosti aplikace technologie fytoextrakce, resp. fytoextrakce toxických kovů ze znečištěných půd pomocí technického konopí (*Cannabis sativa* L.)“.

Použití fytoextrakční metody je zaměřeno na odstranění anorganických kontaminantů, resp. toxických kovů ze zeminy odebrané z průmyslového brownfieldu. Způsob provedení experimentu je zaměřen tak, aby pro aplikaci technologie fytoextrakce bylo docíleno přirozených podmínek prostředí.

Dílčí cíle disertační práce je možné postupně seřadit, podle toho, jak byly naplánovány činnosti pro realizaci cílového experimentu celé práce:

- Nejprve byl vybrán substrát, který se jevil jako vhodný pro následující aplikaci fytoextrakce toxických prvků z půdy pomocí technického konopí. Proto, aby mohl být vybrán vhodný substrát pro aplikaci experimentu *in situ* bylo nutné sestavit předběžný laboratorní experiment. Ten určil, která zemina bude pro zahájení cílového výzkumu vhodnější. Podrobnější informace o postupu zpracování tohoto dílčího cíle jsou uvedeny v Kapitole 3. 1 a Kapitole 8. 1.
- Dalším krokem, který byl založen na výsledcích předběžného laboratorního experimentu – výběr vhodného druhu substrátu - je samotná aplikace technologie fytoextrakce *in situ*. Stručný popis založení tohoto experimentu je uveden v Kapitole 3. 2. Podrobné informace o výchozím pokusu disertační práce jsou uvedeny v Kapitole 8. 2.
- Pro ověření možnosti využití technického konopí pro účely fytoextrakce toxických prvků v konkrétně znečištěné zemině byly provedeny chemické analýzy (viz Kapitola 3. 3 a Kapitola 9 a 10), které se dají rozdělit do dvou následujících kroků:
  - Analýza odebrané zeminy z brownfields pro podrobnou charakteristiku této zeminy, na které experiment proběhl (viz Kapitola 9).
  - Analýza rostlinného materiálu pro ověření schopnosti technického konopí akumulovat toxické prvky z půd (viz Kapitola 10).

### 3 Postup a metody zpracování disertační práce

Postup a metody použité při zpracování disertační práce zahrnují pět hlavních kroků postupu řešení celé disertační práce. Výsledkem provedení jednotlivých činností je splnění stanovených cílů práce (viz Kapitola 2).

Postup a metody zpracování lze rozdělit takto:

- Předběžný laboratorní experiment
- Aplikace technologie fytoextrakce *in situ*
- Analýza rostlinného materiálu, odebrané zeminy a vyhodnocení naměřených výsledků

#### 3.1 Předběžný laboratorní experiment

Z průmyslového brownfields byly odebrány dva druhy zeminy. Pro provedení cílového pokusu byl však vybrán pouze jeden druh substrátu. Selektivní výběr zeminy proběhl na základě prokázání schopnosti technického konopí růst na konkrétním typu substrátu. Ten substrát, který byl vyhodnocen jako vhodnější, byl použit při aplikaci výchozího pokusu *in situ*. Podrobný popis předběžného laboratorního experimentu je uveden v Kapitole 8.1.

#### 3.2 Aplikace technologie fytoextrakce *in situ*

Aplikace technologie fytoextrakce toxických prvků z půdy pomocí technického konopí proběhla v přirozených podmínkách na předem vybraném druhu zeminy. Experiment proběhl bez jakéhokoli vnějšího zásahu, tzn. bez umělého zavlažování, hnojení a jiných zákroků, které by mohly narušit přirozené abiotické podmínky. Průběh provedení cílového pokusu je popsán v Kapitole 8.2.

### 3.3 Analýza rostlinného materiálu, odebrané zeminy a vyhodnocení naměřených výsledků

Vyhodnocení možnosti aplikace fytoextrakce se týkala ověření schopností rostlin akumulovat kontaminanty z půdy. Nedílnou součástí využití této metody je také hodnocení odebrané zeminy, která byla pro pokus použita. Analýza odebrané zeminy měla především kvantitativní charakter. Rostliny technického konopí byly analyzovány jednak kvalitativně a jednak kvantitativně.

Pro analýzu zeminy byly použity následující analytické metody (viz Kapitola 9):

- Atomová emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem
- Atomová absorpční spektrometrie
- Analyzátor AMA 254
- Rentgenová difrakční fluorescence
- Sekvenční extrakce podle Tessiera

Pro analýzu rostlinného materiálu byly použity tyto analytické metody (viz Kapitola 10):

- Kvalitativní analýza
  - Elektronová skenovací mikroskopie
  - Energo-disperzní mikroanalýza
- Kvantitativní analýza
  - Atomová absorpční spektrometrie

Principy všech uvedených analýz jsou uvedeny v Příloze č. 1 disertační práce (viz Příloha č. 1).

## 4 Teoretická východiska

V této kapitole je definován pojem brownfields a způsob typizace a kategorizace těchto lokalit. Jejich zařazení vyplývá jednak ze způsobu jejich předchozího využití a jednak podle jejich potenciálu pro budoucí využití.

### 4.1 Definice brownfields a jejich kategorizace

Problematika brownfields je mezioborová, často proto záleží na odborném zaměření dotčených stran. Definice brownfields není jednotná a často ani legislativně ukotvená a proto k ní může být přistupováno různými způsoby. Jedním z nejvýraznějších rozdílů v pojetí tohoto termínu je mezi evropským a americkým výkladem. Evropská definice byla zavedena multidisciplinární sítí expertních skupin spolupracujících na projektu s názvem Concerted Action on Brownfield and Economic Regeneration Network (dále jen CABERNET). V Evropě je lokalita brownfields považována za území, které se jeví být pro trh nezajímavou nemovitostí, nemovitostí málo využitou nebo stojící ladem a která navíc může být environmentálně zatížena (viz Kapitola 4.1.1). Americká definice, zavedená Environmental Protection Agency (dále jen US EPA), která vychází z federálního zákona USA z roku 2002, považuje území brownfields za místo s dobrým potenciálem pro umístění podnikatelského záměru a neuvažuje nad ním jako o pro trh jednotvárné lokalitě (viz Kapitola 4.1.2).

#### 4.1.1 Definice podle Concerted Action on Brownfield and Economic Regeneration Network (CABERNET)

Podle projektu CABERNET jsou lokality brownfields definovány takto:

1. byly dotčeny vlastním předchozím využitím nebo využitím okolí;
2. jsou opuštěné nebo využité pouze částečně;
3. nacházejí se ve zcela nebo částečně urbanizovaném území;
4. vyžadují intervenci, mají-li být znovu smysluplně využívány;
5. mohou mít skutečné nebo potenciální problémy se znečištěním.

#### **4.1.2 Definice podle US Environmental Protection Agency**

Tato definice byla v roce 2002 zavedena US EPA a je ukotvena v Zákoně č. 107-118 (H. R. 2869).

„Brownfield je nemovitost, jejíž rozšíření, redevelopment, nebo znovuvyužití může být komplikováno přítomností nebo potenciální přítomností nebezpečné látky, znečišťující látky nebo kontaminantu.“ ([www.epa.org](http://www.epa.org) 2014)

#### **4.2 Typy a kategorizace brownfields**

Rozdělení brownfields do jednotlivých typů a kategorií je důležité zejména při průzkumu území například při řešení regenerace těchto ploch, zjišťování potenciální kontaminace území a také při uplatňování návrhů budoucího využití konkrétních lokalit.

V následujících podkapitolách jsou uvedeny dva způsoby klasifikace brownfields lokalit. Jedním přístupem je roztrídění ploch podle jejich předchozího využití (Lepob 2006) a druhý je zařazuje do kategorií podle jejich komerčního využití (CABERNET 2004).

##### **4.2.1 Typizace brownfields podle původu**

Jedním z možných způsobu rozdělení brownfields je na základě jejich předchozího využití. Během období strukturálních a politických změn, přesunu činností k lehkému průmyslu, službám a demografickým změnám docházelo k postupnému úpadku mnoha průmyslových odvětví. Původní provozy ztratily smysl a staly se nevyužívanými. Zpočátku vznikaly brownfields především zemědělské a průmyslové, poté se k nim přidaly vojenské, železniční a dopravní. Brownfields dříve označované jednotlivě jako institucionální, obchodní, kulturní a rekreační jsou dnes řazeny do kategorie sociální brownfields. Tyto brownfields vznikají působením různých demografických jevů jako je například nezaměstnanost, migrace občanů za prací, ale také například výstavbou velkých komerčních center.

V následujícím přehledu jsou uvedeny nejčastější typy brownfields podle jejich původního využití (Lepob 2006):

- průmyslové (viz Obrázek č. 1);
- vojenské (viz Obrázek č 2);
- železniční a dopravní;
- zemědělské (viz Obrázek č. 3);
- institucionální (školy, nemocnice, věznice) (viz Obrázek č. 4);
- obchodní (nákupní střediska, úřady);
- kulturní (kulturní domy, kina) (viz Obrázek č. 5);
- rekreační (sportovní hřiště, parky, volné prostory) (viz Obrázek č. 6).



Obrázek č. 1: Bývalé Chemické závody Hrušov, Ostrava – Hrušov – průmyslový brownfield (foto: Macečková)





Obrázek č. 2: Vojenský brownfield, Osoblaha ([www.risy.cz](http://www.risy.cz) 2015)



Obrázek č. 3: Zemědělský brownfield v zaniklé obci Studnice (foto: Macečková)



Obrázek č. 4: Zámek v obci Jindřichov – kulturní brownfield (foto: Macečková)



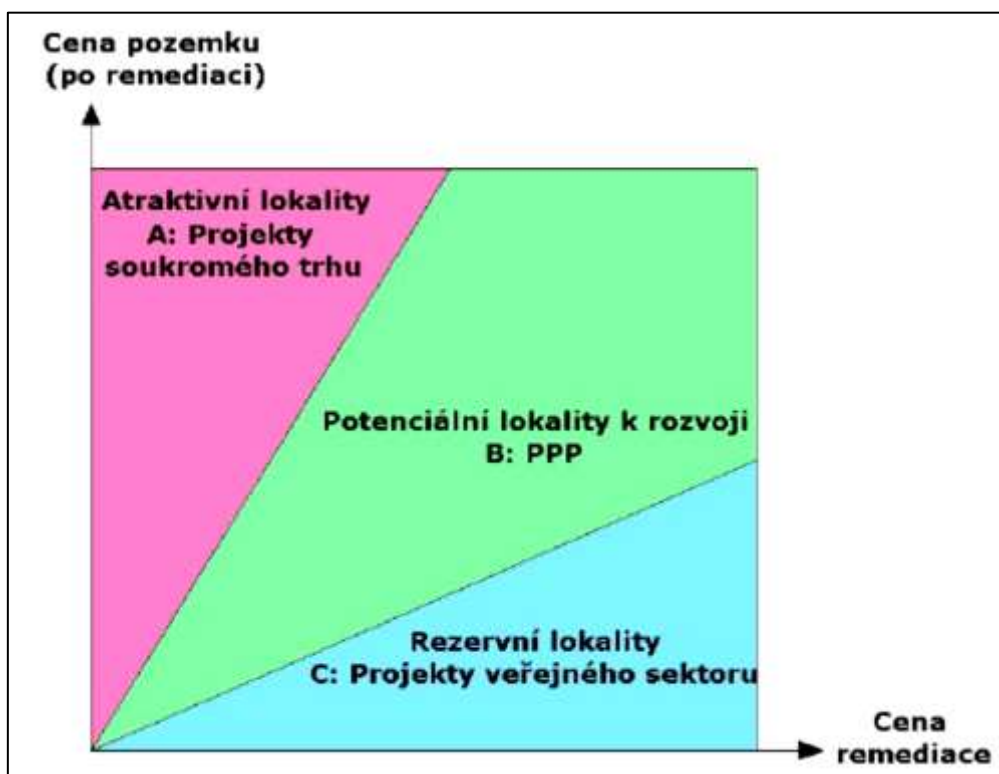
Obrázek č. 5: Gymnázium Sándora Petőfiho, Banská Štiavnica (SK) – institucionální brownfield (foto: Macečková)



Obrázek č. 6: Nedostavěný sportovní stadion, Zvolen (SK) – rekreační brownfield (foto: Macečková)

#### 4.2.2 Kategorizace brownfields podle potenciálního využití území

Toto členění slouží pro jednoduchou orientaci v otázce řešení rozvojového potenciálu jednotlivých lokalit. Rozdělení brownfields území do kategorií „A“, „B“, „C“, které navrhl projekt CABERNET je způsob klasifikace, který je již v Evropě běžně používán (viz Obrázek č. 4). Vojvodíková *et al.* (2014) přidává do klasifikace kategorii „D“.



Obrázek č. 7: Kategorizace BF podle pravděpodobnosti jejich znovuvyužití, překlad J. Bergatt Jackson; ([www.cabernet.org.uk](http://www.cabernet.org.uk))

Kategorie „A“ jsou brownfields, které je soukromý trh schopen absorbovat sám. Mají dobrou lokaci, jednoduché vlastnictví a málo problémů (např. absence kontaminace). V těchto případech nelze odůvodnit použití veřejných financí. Veřejná iniciativa je zde ale prospěšná, ale většinou ne zcela nezbytná.

Kategorie „B“ jsou brownfields, která mají určité množství problémů – například vlastnické vztahy, kontaminace území – a také určité množství atraktivit. Soukromá investice do těchto brownfields nemá dostatečnou návratnost a je potřeba určitá veřejná podpora, která by aktivovala soukromý kapitál k investici. V případě těchto brownfields jde o to je co nejvhodněji a nejlevněji přeměnit na typ brownfields A, o který se postará

sám trh nemovitostí. Tyto typy brownfields jsou velmi vhodné pro modely PPP - partnerství soukromého a veřejného sektoru - public - private - partnership.

Kategorie „C“ zahrnuje brownfields, které nemají momentální řešení. U těchto brownfields chybí návratnost investice, nový záměr spolu s jeho novými uživateli. Rozvoj těchto lokalit je v daný okamžik obtížný. Jejich přítomnost v obci může mít často společenský význam. Často mohou blokovat budoucí rozvoj obce. Přiměřenou veřejnou podporou lze některé z těchto brownfields přeměnit na brownfields typu B.

Do kategorie „D“ jsou řazeny brownfields, které představují rizika různého původu a ohrožují zejména lidské zdraví a životní prostředí. Tyto lokality jsou negativně vnímány a řešení jejich znovuvyužití je dlouhodobě nemožné. Tento typ brownfields představuje riziko týkající se například špatného stavu budov, které se na jeho území vyskytují. Ale také mohou přinést riziko kontaminace území, která je již prokázána anebo může být na základě předchozího využití území předpokládána. Tento typ brownfields může být zpravidla regenerován za předpokladu vysokých dotací z veřejných prostředků (Vojvodíková *et al.* 2014).



## 5 Regenerace brownfields

V této kapitole je popsána problematika ekologických zátěží vznikajících na brownfields a jejich řešení ve smyslu sanace tohoto území běžně používanými metodami. Tyto sanační technologie jsou podrobně charakterizovány v následujících podkapitolách (viz Kapitola 5.1 a 5.2).

Ekologické zátěže jsou nejčastěji doprovodným jevem průmyslové činnosti. Ta je rizikovými aktivitami provázena nejen od počátku zahájení provozu ale i po jeho ukončení. Po ukončení provozní činnosti průmyslového podniku, může z důvodu nízké tržní poptávky zůstat zastavěná plocha bez aktuálního užitku. Bez vnějšího zásahu se z tohoto území postupem času stane brownfield. Tato plocha může ležet ladem i několik dalších let bez zájmu a také bez potřeby zjišťování přítomnosti ekologické zátěže (Bergatt Jackson a kol. 2004). Pokud pro brownfield neexistuje plán pro jeho budoucí využití, je možné pro něj najít dočasné uplatnění. Řešením může být ozelenění této momentálně nevyužívané plochy. V případě území, které je v důsledku jeho předchozího využití kontaminováno znečišťujícími látkami, může být tento postup dílčím řešením odstranění přítomného znečištění. Výběrem vhodného druhu rostliny, známého pro svou charakteristickou vlastnost schopnost akumulovat znečišťující látky z půdy a následně je zabudovat do své vnitřní struktury, může dojít ke snížení přítomnosti kontaminantů v půdě. I přesto, že tato metoda není schopna zcela dekontaminovat konkrétní plochu, může být vhodným začátkem pro budoucí odstranění ekologické zátěže z území jednou z konvenčních sanačních technologií, případně jejich kombinací (viz Kapitola 5.1).

### 5.1 Sanační technologie

Pokud je na území brownfields prokázáno znečištění, které je ohrožujícím faktorem pro lidské zdraví, životní prostředí nebo zdroje potravy je nutné jej řešit vhodně zvolenou sanační technologií. Prioritou při odstraňování znečišťujících látek z prostředí je použití účinné technologie se šetrným přístupem k životnímu prostředí spolu s nízkými finančními náklady spojených s její aplikací.

Sanační metody lze rozdělit na základě několika kritérií (Kubala *et al.* 2002), konkrétně podle:

- dekontaminovaného media:
  - zeminy, sedimenty a kaly;
  - podzemní vod, povrchové vody a průsaky (výluhy);
  - vzdušné emise, plyny.
- vybrané strategie:
  - degradace nebo změna kontaminantu;
  - extrakce nebo separace kontaminantu ze znečištěného materiálu, resp. fáze;
  - imobilizace kontaminantu.
- místa realizace:
  - *in situ*;
  - *ex situ*.
- míry používání a účinnosti – při vyhledávání vhodné metody pro sanaci.

Existuje řada sanačních metod pro odstranění znečišťujících látek z prostředí, ať se jedná o dekontaminaci půdy, plynné fáze média, podzemní i povrchové vody nebo například sedimentů. Základním dělení je rozlišení technologií podle principu, který je pro odstraňování polutantů využíván a to na chemické, fyzikální/fyzikálně - chemické nebo biologické metody. Jak už bylo zmíněno, jedním z hlavních kritérií při výběru vhodné sanační metody je typ znečištěné báze – půda, půdní vzduch, stavební suť, podzemní nebo povrchové vody a další. Vzhledem k tématu předkládané práce budou popisovány technologie, které se soustředí na sanaci půd. Dalším významným kritériem je místo realizace (*in situ*, *ex situ*) odstranění, nebo zmírnění vlivů kontaminantů z konkrétního materiálu, resp. fáze (Hamby 1996). Následující přehled (viz Tabulka č. 1) používaných sanačních technologií pro remediaci půd rozděluje metody podle principů, na kterých jsou založeny (Frankovská *et al.* 2010, Yao *et al.* 2012).

Tabulka č. 1: Rozdělení sanačních technologií půd a půdního vzduchu (Kubala et al. 2002)

<b>Sanační technologie</b>
<i>Chemické metody</i>
Stabilizace (fyzikálně – chemická metoda)
Solidifikace
Chemická oxidace/redukce
Extrakce rozpouštědly
Dehalogenace
<i>Fyzikální metody</i>
Vymývání půdy
Elektrokinetická dekontaminace
Termická desorpce
Sanační čerpání
Promývání
Překrývání
<i>Biologické metody</i>
Biodegradace
Bioventing
Kompostování
Landfarming
Řízené biologické ošetření tuhé fáze

## 5.2 Často používané dekontaminační technologie v ČR

**Venting** je dekontaminační proces jehož podstatou je odsávání (odčerpávání) plynné fáze – vzduchu z kontaminované zeminy nebo horninového materiálu. Jedná se o často používanou metodu, která je vhodná pro použití *in situ* i *ex situ*. Technologie je vhodná pro odstraňování těkavých a některých semitěkavých látek z nesaturované zóny. Na začátku dekontaminace jsou podmínky statické a distribuci kontaminantů ve složkách zeminy lze popsat řadou rovnovážných parametrů. Během sanačního zásahu se však podmínky mění na dynamické zejména kvůli snížení koncentrací odváděných kontaminantů, i přes výrazně složitější chování je možné vycházet ze snadno získatelných rovnovážných parametrů. V místě aplikace ventingu pro *in situ* využití je nutné vytvořit systém odsávacích vrtů. Těmito vrty je odsáván kontaminovaný vzduch, který je následně čištěn tak, aby jeho složení odpovídalo příslušným limitům a mohl být vypuštěn do atmosféry. Čištění vzduchu probíhá sorpcí na aktivním uhlí (menší podíl znečišťujících látek) nebo katalytickým spalováním (vysoký obsah polutantů). V případě aplikace metody



*ex situ* je nutné nejprve kontaminovanou zeminu odtěžit a převést na místo vyhrazené pro dekontaminaci. Tento proces zvyšuje finanční náklady oproti nákladům při použití metody *in situ*. Výhodou je však předúprava odtěžené zeminy, která přispívá ke zvýšení účinnosti technologie. Po úpravě homogenizací, je zemina rozprostřena na nadzemní síť potrubí napojeného na čerpadla, kterými je opět vzduch odsáván s obdobným principem jeho čištění. Výhodou použití ventingu *in situ* je možnost kontroly celého procesu a vyloučení případné předúpravy kontaminovaného materiálu (Kubala *et al.* 2002).

Principem metody nazvané **bioventing** je vhánění kyslíku do nesaturované zóny pro podporu činnosti přítomných mikroorganismů, čímž dochází k urychlení biologické degradaci kontaminantů (Kubala *et al.* 2002).

**Bioremediace** je označením procesu, ve kterém je pro odstranění nebo transformaci polutantů na netoxické látky využíváno různých druhů organismů. Nejvhodnějšími druhy skupiny organismů jsou mikroorganismy. Ty se nejvýznamněji podílejí na biotransformačních dějích, disponují vysokou rychlostí reprodukce a přizpůsobivostí. Mikroorganismy můžeme rozdělit do tří hlavních skupin: a) bakterie (působící v saturované zóně); b) aktinomycey (nesaturovaná zóna zeminy do hloubky kořenových systémů); c) houby (nesaturovaná zóna do hloubky kořenových systémů). Důležitým faktorem při výběru vhodné remediační metody je přítomnost kyslíku během procesu. Mnoho kontaminantů totiž nepodléhá aerobnímu rozkladu (chlorované uhlovodíky včetně PCB). V České republice jsou uplatňovány technologie vycházející z aerobních procesů, ty jsou používány zejména pro odbourávání ropných uhlovodíků. Pro zvýšení účinnosti bioremediačního procesu jsou využívány technicky urychlené systémy, kdy jsou do kontaminovaného prostoru zaváděny různé substance, aby došlo k urychlení reprodukce mikroorganismů a tak i degradaci kontaminantů. Rozdíl v uspořádání technologie *in situ* je obdobný jako u ostatních popsaných metod. *In situ* jsou z rozmístěných cisteren přiváděny do řešeného prostoru živiny a kyslík pro podporu růstu mikroorganismů a následně probíhá čištění fází. V případě aplikace *ex situ* je kontaminovaná půda vytěžena a odvezena na místo určené pro sanaci, kde jsou do předupravené zeminy uměle introdukovány mikroorganismy společně s mechanicky dodávaným kyslíkem (Kubala *et al.* 2002).

**Promývání, resp. praní zemin** se rozumí remediační technologie pracující na principu převedení kontaminantů z tuhé fáze do vodné fáze, do které jsou přidávány chemikálie za účelem zvýšení účinnosti. Rozdíl mezi promýváním a praním zemin je v místě realizace procesu dekontaminace. Pokud je metoda používána *in situ*, je označována jako promývání zemin a pokud je aplikována *ex situ*, je pro tento proces používán termín praní zemin. Při uplatňování této metody jsou uplatňovány dva mechanismy a to: a) rozpouštění kontaminantů do extrahující vodné fáze; b) dispergování kontaminantů do extrahující vodné fáze za vzniku suspenze. Při promýváním zemin, tedy aplikace technologie *in situ* dochází k přímému vtlačování extrahující vodné fáze do kontaminovaného horninového prostředí pomocí zasakovacího systému nebo vtlačovacích vrtů. Samotné použití vody by nebylo dostatečně efektivní, a proto se do ní přidávají chemická činidla, která spolu s ní vytvářejí vhodné extrakční činidlo. Typy chemikálií jsou vybírány s ohledem na povahu znečištění. Vodná fáze, která prošla horninovým systémem je zpět odčerpávána čerpacími vrty. V případě aplikace technologie *ex situ* dochází k odtěžení a předúpravě zeminy, která spočívá v její pečlivé homogenizaci. Extrakční činidlo je stejné povahy jako u promývání půdy. Po ukončení procesu dochází k separaci fází. V tomto kroku procesu jsou vyčištěné, resp. částečně vyčištěné částice zeminy – zpravidla frakce větší než 0,03 – 0,06 mm – odděleny od extrakčního roztoku. Toto oddělení je zpravidla prováděno pomocí usazovacího zařízení. Oddělený extrakční roztok je i se zbytkovou jemnou frakcí zeminy – nesoucí nejvyšší koncentraci kontaminantu – následně dočišťován, například v hydrocyklonech. Výsledkem této separace fází je získání: a) částečně vyčištěné frakce zeminy – obecně šterková a písečná frakce – která může být jednak vyčištěna ve druhém stupni čištění anebo pokud je stupeň vyčištění dostatečný, libovolným způsobem využita; b) směsi extrakčního činidla, jemné frakce zeminy a vylouženého kontaminantu, která je dále zpracovávána běžnými postupy jako je například koagulace, srážení atp. – vzniklé kaly jsou většinou ukládány na skládku (Kubala *et. al* 2002).

**Metoda nahrazení kontaminované zeminy zeminou čistou** je další z používaných metod. Výměna kontaminované zeminy spočívá v jejím úplném nebo částečném nahrazení zeminou, která je znečištění prostá za účelem rozředění koncentrace polutantů

a snížením výměnné kapacity v prostředí. Tento proces je možné rozlišit na tři typy: a) Kontaminovaná půda je vytěžena a nahrazena novou půdou. S odtěženou půdou je nutné nakládat tak, aby nedocházelo k sekundárnímu znečištění prostředí, tzn., je nutné provést taková opatření, která zabrání interakci kontaminované zeminy s půdou, na kterou je ukládána b) Hloubkové prorývání kontaminované půdy má znečišťující látky dostat do hlubokých míst v méně koncentrované formě tak, aby došlo k jejich přirozené degradaci. c) Navezením nové neznečištěné půdy dochází k překryvu kontaminované půdy (Kubala *et al.* 2002).

**Termická desorpce** je sanační technologie využívaná *ex situ*. Tato metoda je vhodná pro odstraňování organických polutantů a některých toxických kovů jako je například rtuť. Princip této metody spočívá v oddělování kontaminantů od matrice – zeminy, ale také například kalu - vlivem zvýšené teploty. Matrice při tomto procesu zůstává zachována. Kontaminovaný materiál je nejprve předupraven drcením na určitou frakci a poté je vystaven působení teplot - termická desorpce je buď vysokoteplotní 320~560°C (odstraňování středně těkavých organických polutantů a pesticidů a některých toxických kovů) anebo nízkoteplotní 90~320°C (odstraňování halogenovaných a nehalogenovaných těkavých organických sloučenin). V této fázi jsou kontaminanty desorbovány a převedeny do fáze páry, která je spolu s nosným plynem dále zpracovávána. Jako nosný plyn se nejčastěji používá dusík, který vytváří inertní atmosféru, ve které nevznikají nebezpečné meziprodukty. Tato plynná fáze je vedena přes chladič systémy, ve kterých dochází ke krystalizaci anebo kondenzaci polutantů, které jsou společně se zkondenzovanou vodou – obsaženou ve zpracovávaném materiálu – označovány jako kondenzát. Ten podléhá dalšímu zpracování, jako je například jeho spalování, případně jiné vhodné metody. Další postup zpracování této plynné fáze je její prostup přes systém čištění plynů anebo aktivní uhlí. Jsou-li splněny emisní podmínky dané platnou legislativou, je plynná fáze vypouštěna do atmosféry. Vzhledem k vysoké účinnosti této metody, může být dekontaminovaný materiál znovu použit. Tato metoda je i navzdory její vysoké efektivitě stále považována za finančně i provozně velmi náročnou (Randula *et al.* 2012, Yao *et al.* 2012).

## 6 Využití technologie fytořemediace při řešení technických aspektů regenerace brownfields

Tato kapitola definuje technologii fytořemediace a popisuje možnost jejího využití a také potenciál této dekontaminační metody při odstraňování znečištění z půdy například na lokalitách jako jsou právě brownfields.

Mimo běžně používaných technologií dekontaminace půdy jsou v dnešní době vyhledávány i méně využívané metody. Jednou z těchto metod je fytořemediace. Fytořemediace je definována jako metoda, která využívá zelené rostliny k odstranění škodlivých látek z prostředí nebo k jejich transformaci. Její využití je možné jednak pro organické i pro anorganické znečištění (Raskin *et al.* 1997). Myšlenku fytořemediace uvedl Chaney již v roce 1983 (Chaney 1983). Technologie je založena na principu využití „živého organismu“ a proto existují limity využití metody, jako je například podnebí. Každá rostlina má různé životní nároky, které musí stanoviště, pro jejich úspěšný růst splňovat. Dalším limitem aplikace této technologie je například potřeba přítomnosti živin a kyslíku pro vývoj rostliny, rovněž je nutné sledovat parametry dekontaminovaných půd jako je jejich textura, pH, salinita, koncentrace polutantů a další, která musí být společně s dalšími toxickými látkami v mezích tolerance rostliny<sup>1</sup>. Při výběru této metody je nutné zvážit časovou náročnost aplikace technologie, tento faktor však nebývá vnímán jako negativní. Což vyplývá z faktu, že tato metoda nebývá klíčovou metodou pro odstranění kontaminace z půdy. Jedná se o technologii, kterou je vhodné - především z důvodu časové náročnosti - kombinovat s běžně používanými sanačními metodami (Garbisu & Alkorta 2001). V podmínkách plošně rozsáhlých území s přítomností relativně imobilních kontaminantů, může být právě fytořemediace vhodně zvolenou dekontaminační metodou (Cunningham *et al.* 1995).

Metodu fytořemediace lze uplatnit při odstraňování organických i anorganických polutantů z půdního prostředí. Principy uplatňované při odstraňování těchto typů jsou však zcela odlišné. Tento fakt vyplývá z důvodu biodegradability některých organických látek, tzn., že jsou biologicky odbouratelné působením biologických činitelů, např. půdní mikroorganismy. Některé organické látky je tedy možné odbourat bez nutnosti vnějšího

---

<sup>1</sup> Nejvyšší přípustná koncentrace prvku, která ještě není pro rostlinu toxická

zásahu, resp. použití dekontaminační technologie. Fytoremediace organických látek není tématem příliš prozkoumaným (Garbisu & Alkorta 2001). Pro odstranění anorganického znečištění je tato metoda vhodnou volbou. Zejména z důvodu přítomnosti toxických kovů v půdním prostředí, které není možné žádným biologickým procesem rozložit. V případě kyselého pH půdy může také docházet k uvolnění těchto toxických kovů a zvýšení jejich mobility. To znamená jejich transfer do větších vzdáleností od původního místa výskytu, čímž se zvyšuje jejich míra nebezpečnosti. Fytoremediace anorganického znečištění, především toxických kovů, spočívá zejména v extrakci těchto prvků z půdního prostředí kořenovým systémem rostlin a jejich následné zabudování do vnitřní struktury použité rostliny; případně jejich transformace na méně toxické látky (Meagher 2000). Vzhledem k tomu, že toxické kovy není možné biologicky degradovat, je nutné se zaměřit na metody, které jsou schopny, je ze životního prostředí odstranit. Zmíněná nesnadná degradace těchto prvků společně s jejich toxickými vlastnostmi mohou být ohrožujícími faktory pro lidské zdraví a životní prostředí. Disertační práce se zabývá možností fytoremediace půd znečištěných právě těmito anorganickými polutanty, resp. toxickými kovy.

Potenciál při využití této metody spočívá především v nízkých ekonomických nákladech, nevyužívá pro svou aplikaci těžkou techniku a proto je šetrný k prostředí dále v nízkých energetických nárocích a především je velmi pozitivně vnímána širokou veřejností (Schwitzguébel 2000, Rahimi *et al.* 2013). Tabulka č. 2 popisuje širokou řadu výhod pro různé cílové sektory při zavedení fytoremediace jako funkční dekontaminační technologie na konkrétním postiženém území (Lewandowski *et al.* 2006).

Tabulka č. 2: Výhody zavedení fytořediace pro různé cílové sektory (převzato Lewandowski et al. 2006)

Cílový sektor	Předpoklad	Výhody
Zemědělství	Kvůli znečištěné zemědělské půdy toxickými kovy, nastává omezení produkce	Vyčištění zemědělských ploch umožní znovunabytí produkční hodnoty půd
Veřejná správa	Potřeba vhodné dekontaminační metody pro odstranění toxických kovů z půd	<p>Fytořediace je levnou variantou technologií pro odstranění toxických kovů z půdního prostředí</p> <p>Vyprodukovaná biomasa je jedním z vhodných obnovitelných zdrojů energie</p> <p>Kombinace produkce biomasy a vyčištění zemědělských ploch představuje velký benefit pro region/stát</p>
Průmysl	Průmyslová činnost je zdrojem znečištění životního prostředí a jeho původci by měli aktivně přistupovat k jeho vyčištění, příp. být správními orgány výslovně nabádáni	<p>Fytořediální technologie je nízko nákladovou variantou dekontaminačních postupů pro odstranění toxických kovů z prostředí</p> <p>Po ukončení celého procesu fytořediace vzniká biomasa, která je moderním a značně využívaným obnovitelným zdrojem energie</p>
Spotřebitel	Je ochoten zvýšit své osobní náklady za produkty, které pocházejí z méně znečištěného prostředí a také za energii získanou z alternativních zdrojů	<p>Obnovitelné zdroje energie, tzv. zelená energie</p> <p>Čisté zemědělské plochy a životní prostředí</p>

Chaney *et al.* (1997) uvádí jako další výhodu fytořemediace recyklaci extrahovaných toxických kovů. To znamená, že by tyto akumulované prvky mohly být získány z rostlinných struktur, ve kterých jsou zabudované a následně nějakým způsobem - například komerčně - využity. Největší boom této metody nastal již v devadesátých letech minulého století (Cunningham *et al.* 1995, Raskin *et al.* 1997) a stal se diskutovaným tématem v odvětví dekontaminace půd. Tuto metodu lze aplikovat jak *ex situ* tak i *in situ*.

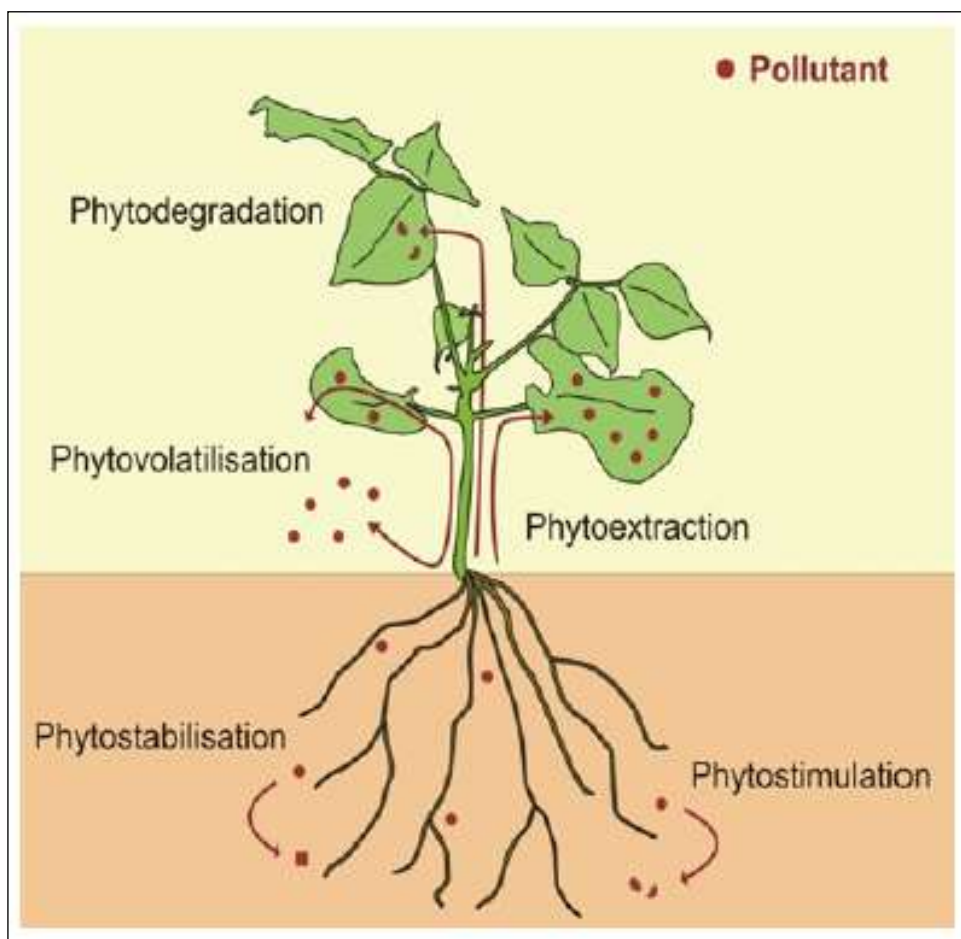
Výhodou *ex situ* experimentu je možnost modelace vlastních podmínek jakou je míra znečištění půdního materiálu známým polutantem, umístění pěstebního recipientu do preferovaného prostředí přirozeného/umělého, kde je možné kontrolovat a mnohdy i nastavovat jeho abiotické faktory – světlo, vlhkost vzduchu, teplota. Všechny tyto podmínky jsou však statickými a nemohou tak simulovat přirozené životní prostředí, které je dynamicky proměnlivé v závislosti například na ročním období, podzemní vodě v území, přítomnosti dalších zdrojů kontinuálního znečištění. Zároveň však tyto modelové experimenty poukazují na možné trendy vývoje chování různých rostlin pro daný znečišťující prvek v konkrétně definovaném prostředí a díky tomu lze v jisté míře naplánovat terénní výzkum tak, aby v něm bylo dosaženo co nejlepších a nejpresnějších výsledků.

Pojem fytořemediace lze na základě dále popsanych mechanismů (viz Obrázek č. 8) rozdělit podle Garbisu & Alkorta (2001) na následující podskupiny:

- Fytoextrakce – využití rostliny pro odstranění kontaminantů z půd. Rostliny schopné akumulovat znečišťující látky jsou používány pro transport a koncentraci látek z půdy do nadzemních částí. Označení procesu fytoextrakce se používá především při odstraňování toxických kovů z půd. Tato metoda je nejvýrazněji odlišována od ostatních uváděných mechanismů fytořemediace (viz Kapitola 7).
- Fytofiltrace a rhizofiltrace – jedná se o proces využití kořenů rostlin nebo mladých sazeniček k absorpci nebo adsorpci polutantů, především kovů, z vodního prostředí.
- Fytostabilizace – rostliny snižují rizika kontaminantů v prostředí zmírněním jejich dostupnosti a fixace v prostředí v půdách čímž snižují jejich nepříznivý vliv

na životní prostředí a zabráňují jejich rozšíření do okolí podpovrchovou vodou nebo působením vzduchu.

- Fytodegradace – rostliny společně s rhizosférickými mikroorganismy mohou degradovat organické znečištění. Při fytodegradaci dochází k přeměně kontaminantů na jejich netoxické formy (Cunningham *et al.* 1995).
- Fytovoltalizace – kontaminant je přijímán kořenovým systémem, odkud je transportován do nadzemní části rostliny, kde je častým doprovodným jevem jeho biotransformace. Poté probíhá transpirace těkavého kontaminantu, těkavého produktu metabolismu nebo těkavé formy původně netěkavé látky (Soudek *et al.* 2008).



Obrázek č. 8: Funkční mechanismy fytořemediace (Pilon – Smits in Souza *et al.* 2013)



## 7 Fytoextrakce toxických prvků z půd

Tato kapitola se zabývá nejen popisem principu fytoextrakce, ale také výběrem vhodné rostliny pro její úspěšné uplatnění. Lze ji rozdělit následovně:

- Popis mechanismu fytoextrakce toxických prvků z kontaminovaných půd
- Charakteristika rostlin označovaných jako hyperakumulátorů
- Charakteristika rostlin označovaných jako nehyperakumulátorů
- Vysvětlení potenciálu využití technického konopí jako nehyperakumulátoru při aplikaci fytoextrakce toxických kovů z půd

### 7.1 Mechanismus fytoextrakce toxických prvků z půd

**Fytoextrakce** – označovaná také jako fytoakumulace nebo fytoabsorpce – je velmi složitý biologický proces. Průběh samotné fytoextrakce je z hlediska času náročnější než běžně využívané metody a to z důvodu různě dlouhých vegetačních období<sup>2</sup> jednotlivých druhů rostlin. Tento proces je interpretován jako příjem kontaminantů z půdy nebo vody kořeny rostlin. Kontaminanty jsou z kořenové soustavy translokovány do nadzemní části rostliny a zabudovány do rostlinných struktur (Ali *et al.* 2013, Prasad & Freitas 2003). Fytoextrakce toxických kovů je metoda ekonomicky nenáročná a díky širokým možnostem jejího uplatnění je využívána při řešení environmentálních problémů spojených s odstraněním toxických kovů z půd (Rascio & Navari - Izzo 1997). Tuto metodu lze využít pro dekontaminaci půd znečištěných jednak anorganickými a jednak organickými polutanty (Bhargava *et al.* 2012). Podnětem pro rozvoj této metody byl objev různorodých volně rostoucích rostlin (většinou endemického původu) na přirozeně mineralizovaných půdách, které v listech akumulovaly vysoké koncentrace esenciálních i neesenciálních těžkých kovů (Raskin *et al.* 1997).

**Pro naplnění ideální účinnosti fytoextrakční technologie by bylo zapotřebí vyšlechtit takovou rostlinu, která by byla schopna akumulovat vysoké koncentrace toxických kovů z půd bez známky fytotoxicity a současně by dosahovala nadprodukčního množství biomasy. Rovněž by měla splňovat dvě základní vlastnosti**

---

<sup>2</sup> Vegetační období = časový úsek, během kterého – v případě příznivých klimatických podmínek prostředí – probíhají hlavní životní funkce rostliny

a to, že by se mělo jednat o rostlinu, která je v konkrétním prostředí původní a rovněž by měla být zvládnuta celá její agrotechnika. Určit, který typ rostliny je pro fytoextrakci nejvhodnější a je-li účelné použít hyperakumulující nebo nehyperakumulující rostlinu není možné a to i přes znalosti jejich chování (Soudek *et al.* 2014, Bjelková 2011). Proto je důležité prozkoumat další možnosti využití - pro fytoextrakční účely - jednotlivých rostlinných druhů, jako je například právě technické konopí (*Cannabis sativa* L.)

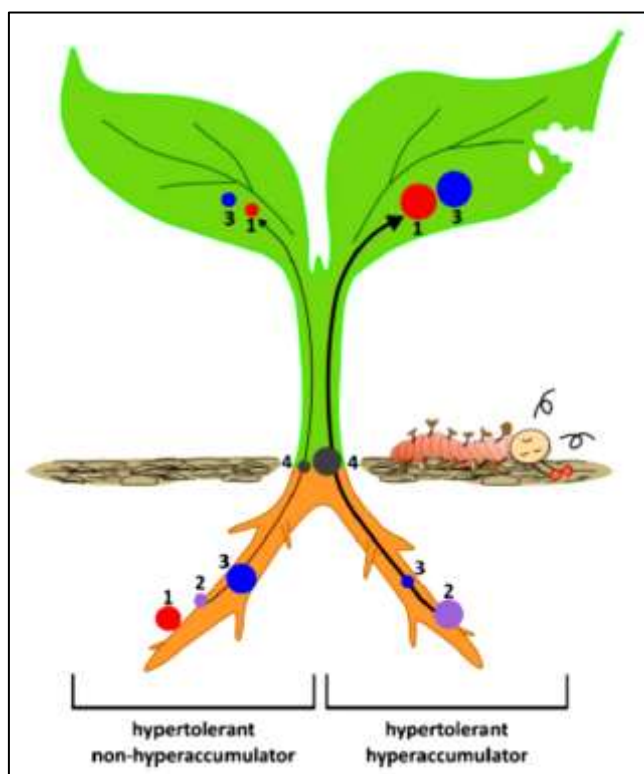
## 7.2 Hyperakumulující rostliny

Pro rostliny využívané při extrakci kovů z kontaminovaných půd existuje jednotné označení **hyperakumulátory**. Jako hyperakumulátory jsou označovány rostliny různorodých čeledí, někdy i velmi vzdálených, které nesou jediný avšak velmi významný znak a to schopnost růstu na metalických půdách a akumulovat velmi vysoké koncentrace těžkých kovů bez známek fytotoxicity. Právě aktivní příjem velkého množství toxických kovů odlišuje hyperakumulátory od ostatních rostlin (viz Obrázek č. 9). Toxické kovy navíc nejsou ukládány pouze v kořenovém systému (kterým jsou akumulovány), ale jsou translokovány do nadzemních orgánů rostlin, zejména listů. Hyperakumulující rostliny jsou schopny pojmout až 10x více toxických kovů z půd, avšak mnohdy na úkor množství vyprodukované biomasy na jednotku plochy a to i po více než jedné sklizni. Hlavními znaky, které tyto rostliny odlišují, od rostlin s nižší schopností akumulace toxických kovů jsou: výrazně lepší schopnost příjmu toxických kovů z prostředí; rychlá translokace látek z kořene do nadzemních částí rostliny; schopnost zadržení toxických kovů v buněčných stěnách listů. I přes vysoké koncentrace toxických kovů nejeví hyperakumulátory známky fytotoxicity. Jedna z hypotéz vysvětlující princip hyperakumulace spočívá v látkové obraně rostliny, kdy takto vysoké množství těžkých kovů, má být obranným mechanismem vůči jejich přirozeným nepřítelům jakou jsou například herbivoři<sup>3</sup>. Novější hypotéza (Rascio *et al.* 2011, Yang *et al.* 2005) hovoří o spoluúčinku těžkých kovů a organických obranných látek, který má zlepšovat všeobecnou obranyschopnost rostliny. Popsané znaky přiřazující rostlinám tento status jsou výsledkem dlouhodobých studií. Kritéria, pomocí kterých vědci (Liang *et al.* 2009, Nazir *et al.* 2011) určují potenciál rostlin pro fytořemediace půd zatížených toxickými kovy jsou následující: biokoncentrační faktor (BFC), bioakumulační

---

<sup>3</sup> herbivor = býložravec

faktor (BAC), faktor biologického transferu (BFT) a množství vyprodukované biomasy během procesu fytoremediace. I přes výsledek studií, kdy hodnoty BFC, BAC, BTC byly vyšší než 1, nebylo jednoznačně určeno, jsou-li tyto rostliny hyperakumulátory vzhledem k doprovodným znakům, jako je například již zmíněná nízká produkce biomasy. Hyperakumulující rostliny pocházejí nejčastěji z čeledi *Brassicaceae* – brukvovité a jejich zástupci brukev řepka (*Brassica napus*), brukev řepák (*Brassica rapa*), penízek modravý (*Thlaspi caerulescens*), tařinka (*Alyssum Bertolonii*) dále potom z čeledi *Compositae* – hvězdicovité a její zástupce locika salátová (*Lactuca sativa* L.), *Fabaceae* – bobovité například fazol obecný (*Phaseolus vulgaris* L), také to jsou různé druhy kostřav (*Festuca* spp.) z čeledi *Poaceae*. Někteří zástupci těchto čeledí jsou schopni akumulovat z půdy až 1 000 mg/kg olova a do 50 mg/kg koncentrace kadmia, což je u těchto toxických kovů poměrně vysoké množství. Jak uvádí řada autorů (Tlustoš *et al.* 2006, Vamerali *et al.* 2010, Girdhar *et al.* 2014), každá rostlina má však různou míru tolerance k přítomnosti toxických kovů v jejích rostlinných orgánech.



Obrázek č. 9: Rozdíl akumulace kontaminantů u ne-hyperakumulátorů (vlevo) a hyperakumulátorů (vpravo) (Rascio & Navari - Izzo 2011)

### 7.3 Nehyperakumulující rostliny

Podle řady studií (Liang *et al.* 2009, Tlustoš *et al.* 2006, Marchiol *et al.* 2007, Soudek *et al.* 2014) **nehyperakumulující rostliny** nejsou schopny přijímat tak vysoké množství znečišťujících látek jako hyperakumulátory. Mají však zpravidla vyšší produkci biomasy než hyperakumulující rostliny a proto jsou považovány za rostliny vhodné pro fytoremediace, resp. fytoextrakci toxických prvků z půdy. Vysoká produkce biomasy u těchto rostlin může téměř zcela kompenzovat nižší příjem kontaminantů než jako tomu je u hyperakumulátorů. Nehyperakumulující rostliny jsou schopny pojmout určité množství kontaminantů především na území, kde znečištění není příliš masivní. Pěstování rostlin s vysokou produkcí biomasy na půdách kontaminovaných toxickými látkami je po využívání hyperakumulátorů, druhým diskutovaným přístupem při využití fytoremediačních technologií. Nehyperakumulující rostlina tabáku virginského (*Nicotiana tabacum*) je právě díky vysoké produkci biomasy schopna akumulovat více kadmia než běžně používané hyperakumulátory jako jsou peníze modravý (*Thlaspi caerulescens*; syn. *Noccaea caerulescens*) a huseníček Hallerův (*Arabidopsis halleri*). Další nehyperakumulující rostlinou s vysokou produkcí biomasy je například světlice barvířská (*Carthamus tinctorius* L.), která vykazuje příjem těchto prvků  $Zn > Pb > Cd$ . Tento trend akumulace toxických kovů se opakuje ve většině studií nezávisle na druhu rostliny, nízké koncentrace kadmia jsou vysvětlovány jeho vysokou toxicitou pro rostliny. Jako další nehyperakumulující rostliny, které se již v praxi používají, příp. jsou testovány lze uvést například čirok dvoubarevný (*Sorghum bicolor*; syn. *Sorghum vulgare*), sléz přeslenitý (*Malva verticillata* L.), komonice bílá (*Melilotus alba* L.), tolce vojtěška (*Medicago sativa* L.), kukuřice setá (*Zea Mays* L.). Rostlinou s vysokým potenciálem pro fytoextrakci toxických kovů je technické konopí (*Cannabis sativa* L.) (viz Kapitola 7.4). Technické konopí je považováno za kulturní plodinu, která má sice na rozdíl od planě rostoucích hyperakumulátorů nižší schopnost akumulovat toxické kovy z prostředí, jednoznačnou kompenzací je však velká tvorba nadzemní biomasy. Zmíněné planě rostoucí hyperakumulátory nejsou geneticky stabilizované a tak pro mnohé z nich neexistuje optimalizovaná technologie pěstování a sklizně.

#### 7.4 Potenciál technického konopí pro fytoextrakci

Technologie fytoextrakce toxických prvků z půd disponuje, jako každá dekontaminační metoda, řadou výhod i nevýhod (viz Tabulka č. 3). Jak již bylo uvedeno v předchozím textu (viz Kapitola 7) důležitým prvkem při aplikaci fytoextrakce je výběr vhodné rostliny. Potenciál technického konopí pro jeho použití v aplikaci metody fytoextrakce toxických prvků z půdy spočívá i v řadě jeho inherentních vlastností. Tyto vlastnosti jsou pro technické konopí typické a odlišují tuto plodinu od ostatních rostlin, které by mohly být pro fytoimediační účely zvažovány. Negativní faktory ovlivňující možnosti využití fytoextrakce, které je možné díky charakteristickým vlastnostem technického konopí redukovat jsou zvýrazněny v následující tabulce (viz Tabulka č. 3). Odkazy na tyto vlastnosti jsou uvedeny v pravém sloupci Tabulky č. 3 s názvem „Vlastnosti technického konopí“. Podrobněji jsou tato specifika technického konopí rozepsána pod touto tabulkou s příslušným odkazem - **i**, **ii**, **iii**, **iv** - uvedeným v tabulce (viz Tabulka č. 3).

Tabulka č. 3: Výhody a nevýhody aplikace technologie fytořemediace, resp. fytoextrakce (převzato z Alkorta et al. 2004)

Výhody	Nevýhody	Vlastnosti technického konopí
Možnost využití pro široké spektrum anorganických a organických polutantů.	Omezení hloubky aplikace metody (zejména vůči velikosti kořenového systému rostlin) dále rozpustnosti a dostupnosti kontaminantů v prostředí.	viz odkaz i
Redukce ukládání odpadů na skládky odpadů.	Pro úspěšnou aplikaci metoda vyžaduje delší časové úseky, je však rychlejší než přirozená atenuace prostředí.	
Aplikace in situ. Redukuje narušení půdního prostředí a rozšiřování kontaminantů v prostředí.	Vhodná pro území s nižšími koncentracemi znečišťujících látek.	
V porovnání s ostatními dekontaminačními metodami je metoda fytořemediace ekonomicky mnohem méně náročná.	Omezujícím faktorem pro použití technologie jsou klimatické podmínky a roční období.	viz odkaz ii
Jednoduchá realizace a údržba. Náklady na pořízení rostlin jsou nízké a energie využívaná pro jejich údržbu je z obnovitelných zdrojů.	Je nutné se vyvarovat zavlečení invazivního druhu rostliny do prostředí.	viz odkaz iii
Jedná se o ekologicky šetrnou metodu, esteticky příjemnou, sociálně pozitivně přijímanou, technicky nenáročnou - nezatěžuje bezprostřední okolí hlukem.	Kontaminanty mohou být přeneseny do jiného media, prostředí, a/nebo potravního řetězce.	viz odkaz iv

Vlastnosti, které zvyšují potenciál technického konopí při využití fytoextrakčních postupů k odstranění polutantů z půdy a zároveň potlačují nevýhody této metody lze vyjmenovat následovně:

- i. Technické konopí má poměrně velký kořenový systém, kterým může akumulovat toxické prvky z půdy. Jak uvádí Amaducci *et al.* (2008) kořeny této plodiny obvykle dosahují do 130 cm hloubky od povrchu země, mohou však dorůst až 2 m hluboko. Nejvyššího účinku akumulace toxických prvků z půdy je dosaženo již v hloubce 50 cm. Díky takto vyvinutému kořenovému systému, je technické konopí schopno velmi účinně akumulovat polutanty z půdy.
- ii. Technickou plodinu *Cannabis sativa* L. je možné pěstovat všude v mírném pásmu až do výšky přibližně 450 m. n. m. Konopí nelze pěstovat na zamokřených nebo trvalých přesušených půdách. Její nároky na půdu jsou však minimální (Honzík 2007).
- iii. Jeden z hlavních důvodů naplňující potenciál využití technického konopí při aplikaci fytoextrakce je fakt, že pro Českou republiku je tato kulturní plodina původní. Historie jejího využití sahá až do doby středověku (viz Příloha č. 2). V České republice je kompletně zvládnuta agrotechnika, technologie sklizně a další zpracování této suroviny. To však neplatí pro uměle introdukované plodiny, u kterých je nutné tyto zkušenosti získat řadou nových výzkumů (Bjelková 2011). Tato plodina je označována jako plodina technická a to zejména pro své využití v různých průmyslových odvětvích jako je například papírenství, energetické využití, stavebnictví a další.
- iv. Technické konopí (*Cannabis sativa* L.) je považováno za technickou (nepotravinářskou) a energetickou plodinu. Nepotravinářská povaha této plodiny znamená - po ukončení fytoextrakce - možnost využití některých jeho rostlinných částí pro další zpracování (textilní průmysl, papírenství). Toto tvrzení však zároveň vyžaduje přísnou kontrolu zpětného uvolňování kontaminantů do prostředí, nastavení hygienických limitů a konkretizaci možnosti použití materiálu tak, aby nedocházelo k poškozování lidského zdraví a životního prostředí (Cascardi 2012). Využití technického konopí

v energetickém průmyslu má smysl jednak pro jeho energetické vlastnosti, resp. jeho výhřevnost a jednak pro již výše zmíněnou známou agrotechniku této plodiny, která usnadňuje technologii jeho pěstování (Kovářová *et al.* 2002). Pro tyto dvě základní vlastnosti lze technické konopí považovat za rostlinu se slibným potenciálem pro uplatnění ve fytoextrakci toxických kovů z půd (Bjelková 2011).

#### **7.4.1 Akumulace a distribuce toxických prvků v rostlině technického konopí (*Cannabis sativa* L.)**

Použití technického konopí (*Cannabis sativa* L.) pro fytoextrakci toxických kovů popisuje řada výzkumných studií (Angelova *et al.* 2004, Meers 2005, Kos & Leštan 2004, Tlustoš *et al.* 2006, Malik *et al.* 2010, Girdhar *et al.* 2014). Zejména z pohledu porovnání jeho schopnosti akumulace polutantů z prostředí s jinými rostlinami a také z pohledu příjmu a distribuce znečišťujících látek v jednotlivých rostlinných orgánech (viz Kapitola 7. 4. 1).

Míra akumulace a distribuce toxických kovů v rostlině technického konopí se liší nejen v závislosti na použité varietě konopí, ale i na množství kontaminantu v prostředí. Shi *et al.* (2012) provedl pot – experiment akumulace a tolerance konstantní koncentrace kadmia (Cd 25 mg/kg) v půdě na osmnácti varietách konopí. Byly potvrzeny signifikantní avšak nepravidelné rozdíly množství tohoto toxického kovu v kořenové soustavě rostliny a jejích nadzemních částí. Použité variety konopí rovněž vykazují rozdílné množství biomasy. Kadmium působí na rostliny toxicky a výrazně inhibuje jejich růst. Rostliny variet, které dosáhly vyššího množství biomasy, byly schopny akumulovat větší množství kadmia a mohou být doporučeny pro uplatnění fytoextrakce na Cd kontaminovaných zemínách.

Bjelková (2011) ověřila nepravidelnost akumulace v rostlině při stupňované dávce Cd do zeminy v rozsahu 10 – 1000 mg/kg. Rovněž byl zaznamenán rozdílný trend množství toxického kovu v celé rostlině a to: kořen > plevy > stonek > semeno. Příjem znečišťující látky jednotlivými částmi rostlin byl také různý – např. do 100 mg/kg kadmia byl nejvyšší podíl látky v plevách, ale od 150 mg/kg Cd v půdě byl příjem jednoznačně vyšší u kořene.



Rozdílná akumulace kadmia se projevila i u čtyř testovaných odrůd technického konopí, která opět potvrdila závislost variety rostliny a schopnosti akumulovat toxický prvek z prostředí. Tyto závislosti však neplatí pouze pro kadmium, ale i pro další toxické kovy. Jedním z nich je například olovo, které bylo opět přidáváno ve stupňované dávce do zeminy v rozsahu 10 – 1000 mg/kg. V tomto případě se trend akumulace v částech rostliny mění a to v pořadí: plevy > kořen > stonek > semeno. Kromě plev, ve kterých se olovo koncentrovalo nepravidelně až do hladiny 100 mg/kg, rostla schopnost akumulace olova v rostlině společně s jeho zvyšující se dávkou v zemině.

Nepravidelný příjem olova byl také zjištěn u čtyř testovaných odrůd konopí, půda byla obohacována stupňovanou dávkou tohoto prvku. Linger *et al.* (2005) se ve svém výzkumu rovněž zabýval vlivem kadmia na růst *Cannabis sativa* L. Toxický kov byl do zeminy vpraven uměle a to ve dvou koncentracích – 17 mg/kg a 72 mg/kg. Významná inhibice růstu plodiny se projevila v případě koncentrace Cd na druhé uvedené hladině, tzn. 72 kg/mg. V případě první uvedené koncentrace prvku rostlina vykazovala, na konci vegetačního období, stejné množství biomasy jako tomu bylo u konopí rostoucím na kontrolním substrátu. Životaschopnost a vitalita jedinců v populaci klesala se zvyšujícím se množstvím polutantu v zemině. Pro tuto studii je možné popsat trend distribuce toxického kovu v rostlině následovně: kořen > stonek > plevy. Právě kořenový systém byl orgánem, který akumuloval v obou případech nejvíce kadmia. Výsledky analýz rovněž prokazují, že s rostoucí koncentrací kontaminantu v prostředí roste i množství prvku, které je rostlina schopna pojmout při jeho extrakci. Pro vysokou odolnost kořenového systému, silnou toleranci vůči kadmiu a schopnosti dlouhodobému přizpůsobení se prostředí může být technické konopí klíčovou rostlinou v oblasti fytoextrakce toxických kovů z půd. Nejen kadmium a olovo jsou toxickými kovy, které jsou extrahovány z půdy pomocí této technické plodiny.

Nikl, chrom i kadmium byly předmětem dalšího výzkumu kolektivu Citterio *et al.* (2003), jehož cílem bylo zjistit míru tolerance a schopnost akumulovat tyto prvky technickým konopím v seminaturálních podmínkách. Půdní substrát byl umístěn do nádob, které byly zapuštěny do země v otevřeném prostředí botanické zahrady. Tento substrát byl uměle znečištěn chemickými roztoky, tak aby bylo docíleno jeho

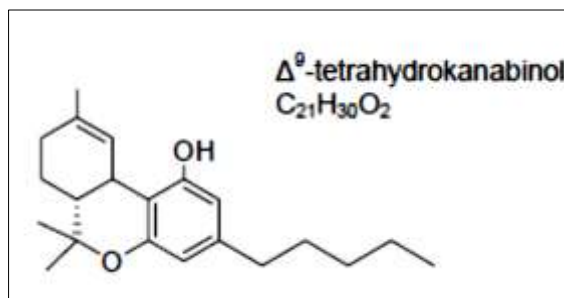
znečištění toxickými kovy ve dvou hladinách pro Cd, Ni a Cr: 27, 74, 126; resp. 82, 115, 139 mg/kg. Pořadí obsahu znečišťujících látek v rostlině po fytoextrakci je následující Cd > Ni > Cr. Chrom byl detekován v zanedbatelné míře a proto se fytoextrakce nejeví jako vhodná metoda pro jeho odstranění z půdního prostředí. Opět však byla potvrzena největší akumulace prvků v kořenovém systému rostliny.

Kvantitativní výsledky chemické analýzy koncentrace polutantů v konopí a jejich porovnání s ostatními druhy rostlin používaných pro fytoextrakci toxických kovů z půdy jej vylučuje z kategorie hyperakumulátorů. Díky vysoké produkci biomasy 10 t/rok, kvalitní kořenové soustavě a možnosti jeho pěstování v různých klimatických podmínkách jej však staví na čestné místo mezi víceúčelově využitelné nepotravinářské plodiny vhodné pro fytoremediační účely (Citterio *et al.* 2003, Linger *et al.* 2002, Angelova *et al.* 2004, Petříková 1999).

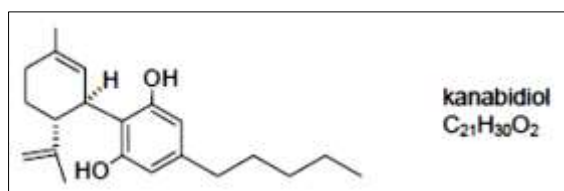
### 7.5 Vysvětlení obvyklých látek sledovaných v technickém konopí

Skupina látek označovaných jako kanabinoidy se v přírodě vyskytují pouze v rostlinách konopí setého (*Cannabis sativa* L.). Je zaznamenáno více než 80 derivátů těchto látek. Nejznámější z nich je  $\Delta^9$  – tetrahydrocannabinol (THC) a kanabidiol (CBD). THC bylo v konopí determinováno teprve v roce 1964 v Izraeli, do této doby, bylo považováno za kanabinol – po THC a CBD třetí nejznámější sloučenina ze třídy kanabinoidů (Bósca 1999) Jedná se o látky, které mají shodné chemické složení, rozdíl je však ve struktuře benzenového jádra, pokud je uzavřené jedná se o látku THC, pokud je otevřené jedná se o CBD (viz Obrázek č. 10 a Obrázek č. 11). THC vzniká biosyntézou kanabidiolu a je považováno za toxikologicky nejvýznamnější složku konopí, která působí na psychiku, vědomí a psychomotorické funkce v těle člověka. Naopak CBD je považován za látku antagonistického charakteru vůči THC a je nositelem pozitivního léčebného potenciálu. (Fišar 2006) Jak již bylo uvedeno výše, ve všech členských státech EU existuje normativní nařízení, které uvádí maximální přípustnou koncentraci THC v konopí určeném pro průmyslové využití, tedy technickém konopí (*Cannabis sativa* L.), rovněž ve státech mimo EU je horní hranice přítomnosti látky THC v technickém konopí legislativně ukotvena. Koncentrace  $\Delta^9$  – tetrahydrocannabinol v technickém konopí je zjišťována běžnými analytickými metodami. Metoda pro kvantitativní určení  $\Delta^9$  – THC v odrůdách

konopí je detailně popsána již ve zmiňovaném Nařízení komise (ES) č. 2860/2000. Rovněž jsou prováděny výzkumy (Mechtler *et al.* 2004) na testování již zaběhlých variet technického konopí pro zajištění jejich udržitelnosti na trhu a současně jsou zkoumány nově vyšlechtěné variety a jejich potenciál pro využití v průmyslu.



Obrázek č. 10: Psychoaktivní  $\Delta^9$  – tetrahydrocannabinol



Obrázek č. 11: : Nepsychoaktivní kanabidiol

Technické konopí je kultivar konopí setého pěstovaný člověkem již od dob starověku ([www.konopa.cz](http://www.konopa.cz) 2015). Komise evropských společenství ve svém nařízení (ES) č. 2860/2000 definuje konopí (anglický název „hemp“) jako technickou plodinu, ve které by obsah THC neměl přesahovat < 0,2 %. Nařízení komise platné od hospodářského roku 2001/2002 snižuje hranici obsahu THC v technickém konopí z hodnoty 0,3 % na uvedených 0,2 % koncentrace látky ve všech schválených odrůdách technického konopí. Snížení hranice koncentrace látky bylo provedeno na základě požadavků členských států Evropské unie v návaznosti na neustávající kriminalitu spojenou se zneužíváním této drogy. V uvedeném nařízení komise EU je rovněž uveden seznam odrůd konopí, resp. lnu pěstovaných na vlákno, které lze zahrnout do režimu podpor pěstitelů této plodiny. (Nařízení komise (ES) č. 2860/2000) Dalším určovacím kritériem pro technické konopí je poměr THC/CBD, který musí být < 1 %, varieta konopí s tímto poměrem látek je považována za plodinu bez psychotropních účinků (de Meijer

*et al.* 1992, Grotenhermen & Karus 1998). Na Obrázku č. 12 je uveden rozdíl mezi stonkem technického a netechnického konopí. Více informací o technickém konopí je uvedeno v přílohách disertační práce (viz Příloha č. 3).



Obrázek č. 12: Příčný řez stonku technického konopí (vlevo) a netechnického konopí - marihuany (vpravo)  
(Small & Marcus 2002)

## 8 Aplikace metody fytoextrakce

Tato kapitola popisuje experimentální část disertační práce. Jedná se o shrnutí všech činností v průběhu přípravy a samotné aplikace metody fytoextrakce toxických prvků pomocí technického konopí na kontaminované zemině odebrané z průmyslového brownfieldu.

Tuto kapitolu lze v zásadě rozdělit na dvě základní části:

- Předběžný laboratorní experiment – cílem tohoto experimentu bylo ověření schopnosti růstu technického konopí na dvou vzorcích kontaminované zeminy odebrané z průmyslového brownfieldu. Výsledkem této části byl výběr vhodnější zeminy pro cílovou studii disertační práce.
- Použití technologie fytoextrakce *in situ* – je praktická aplikace metody fytoextrakce na vybraném typu zeminy na pozemcích společnosti AGRITEC s. r. o. a Cílem této části je posouzení schopnosti technického konopí akumulovat toxické prvky z kontaminované půdy (viz Kapitola 10). Součástí výsledků této práce je podrobné hodnocení odebrané zeminy, zejména jejích chemických vlastností (viz Kapitola 9).

### 8.1 Předběžný laboratorní experiment

Cílem předběžného laboratorního experimentu bylo ověřit schopnost růstu technického konopí na konkrétním druhu kontaminované zeminy. Území průmyslového brownfieldu, na kterém byla zemina odebrána, je považováno – vzhledem k jeho předchozímu využití a výsledkům monitorovacích prací<sup>4</sup> – za kontaminovanou lokalitu.

---

<sup>4</sup> Odebrání zeminy z brownfields bylo, vlastníkem pozemku, podmíněno nezveřejňováním jeho lokace. Nelze proto uvést zdroj výsledků monitorovacích prací. Tento fakt žádným způsobem neovlivňuje postup, výsledky ani závěr práce.

Před zahájením laboratorního pokusu byly naplánovány činnosti, které zahrnují nejen samotný návrh pokusu, ale také jeho provedení a vyhodnocení. Tyto aktivity jsou chronologicky popsány v následujícím schématu (viz Obrázek č. 13).



Obrázek č. 13: Připravené činnosti v rámci předběžného laboratorního experimentu

#### Návrh experimentu

Na základě literární rešerše možností odstranění anorganického znečištění, resp. toxických prvků z kontaminované zeminy na brownfields byl navržen experiment aplikace technologie fytořemediace, resp. fytoextrakce.

#### Provedení předběžného experimentu

Ze zájmové lokality – areál provozu těžkého průmyslu, kde se dnes nachází kontaminovaná půda toxickými kovy - byly odebrány dva druhy zemin. Vzhledem k neznámému rozložení znečištění byly odebrány dva druhy zeminy. Zemina se lišila především místem jeho uložení. Zeminu označenou jako „A“ lze definovat jako antropogenní navážku pocházející z aktivit spojených s průmyslovou činností. Zemina označená jako „B“ byla odebrána na otevřeném prostranství bývalé zástavby průmyslového podniku.

Odebrané zeminy lze dále charakterizovat následovně: zemina A s převažující písčitou frakcí a vlhkostí 91%; zemina B v textuře vykazovala převažující štěrkovou frakci s vlhkostí 69%; kontrolním substrátem C byl komerční zahradnický substrát A pro výsev, množení a řízkování vyrobený z rašeliny a jemně mletého vápence s přidavkem vícesložkového minerálního hnojiva o vlhkosti 60%. Před výsevem byly substráty upraveny prosetím na sítích s velikostí oka 0,8 cm.

Výsev semen probíhal na všech třech substrátech rovnoměrně. V laboratoři byly připraveny plastové kelímky (polystyren) o objemu 0,2 l (viz Obrázek č. 14) jejichž dno bylo vyloženo drobnými oblázky jednak pro vytvoření kvalitního kořenového systému a jednak kvůli zlepšení systému závlahy, kdy kameny svou retencí vody zamezují absorpci závlivky pouze substrátem, což by mohlo vést k úhynu rostlin. Kelímky byly naplněny jednotlivými substráty. Klíčení proběhlo přímým způsobem a to vsazením semena do zeminy. Celkem, ve všech substrátech, bylo vysazeno 147 semen, z nichž byla stanovena klíčivost 75.5%, která je shodná s údaji na návěsce značkového obalu osiva. Pouze rostliny pěstované na zahradnickém substrátu byly po pěti týdnech růstu stejným způsobem přesazeny do větších plastových nádob (polypropylen) o objemu 0,5 l (viz Obrázek č. 15). K selektivnímu přesazení došlo na základě různorodých výsledků růstu konopných rostlin.



Obrázek č. 14: *C. sativa* L. v zahradnickém substrátu      Obrázek č. 15: Technické konopí (*Cannabis sativa* L.)

V případě zeminy A došlo ke značnému omezení vývoje sazenice, předpokladem tohoto omezení může být například přítomnost vysoké koncentrace toxických prvků, resp. toxických kovů v půdě. Tento fakt byl uznán jako inhibující faktor, který by měl být na základě následujících analýz přesně definován (viz Kapitola 9 a 10). Zemina B se ukázala být nejnevhodnějším substrátem pro výsev konopného osivo. Sazenice konopí vysazené na zemině B hynuly téměř bezprostředně (viz Obrázek č. 16 a Obrázek č. 17), nebylo tedy možno získat odpovídající data pro korektní statistickou analýzu. Pro statistické srovnání byly tedy užity pouze hodnoty získané hodnocením sazenic na zemině A a zahradnickém substrátu.



Obrázek č. 16: Uhynulá rostlina technického konopí rostoucí na substrátu „B“ (foto: Macečková)

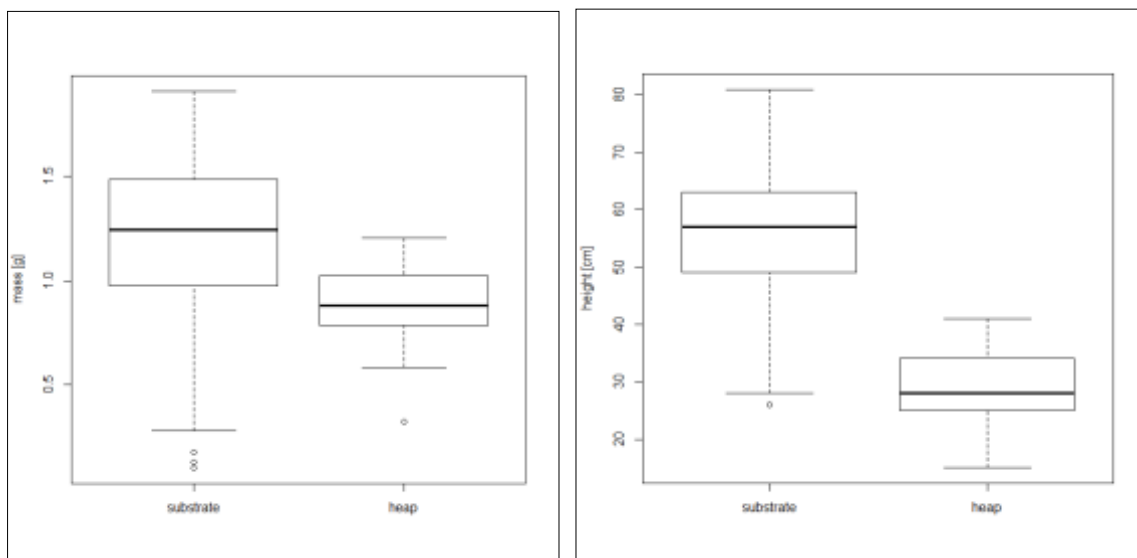


Obrázek č. 17: Srovnání vitality rostlin Cannabis sativa L. na všech substrátech



## Vyhodnocení předběžného laboratorního experimentu

Vyhodnocení experimentu probíhalo na základě vážení biomasy a měření výšky nadzemních částí rostlin. Získané hodnoty byly statisticky zhodnoceny pomocí statistického balíku R (R Development Core Team 2008). Jak v případě zjištěných hodnot biomasy, tak výšky nadzemních částí rostlin, bylo předběžným F-testem zjištěno, že mají oba výběry odlišné rozptyly, pro následné srovnání byl tedy užít Welchův dvouvýběrový t-test pro výběry s neshodnými rozptyly. Výběry se signifikantně lišily v hodnotách zjištěné biomasy na hladině  $\alpha = 0,005975$ ), co se týče výšky nadzemních částí rostlin, rozdíl byl ještě markantnější –  $\alpha = 2,498 \cdot 10^{-6}$ . Významné mezivýběrové rozdíly v těchto hodnotách jsou patrné i z grafů typu boxplot (viz Obrázek č. 18 a Obrázek č. 19), z nichž vyplývá, že je jejich střední hodnota v obou případech vyšší u rostlin pěstovaných na zahradnickém substrátu.



Obrázek č. 18: Biomasa vypěstovaných rostlin *C. Sativa* L. Obrázek č. 19: Výška rostlin *C.sativa* L.

Navzdory tomu, že byly sledované parametry vysazených rostlin jednoznačně horší při pěstování na kontaminované půdě (heap), nelze tento fenomén jednoznačně interpretovat jako důsledek znečištění užitě zeminy. Rostliny mohou zahradnický substrát favorizovat i z důvodu vhodnějších fyzikálně-mechanických parametrů. Míra fytoextrakce bude předmětem následující studie.

### *Aplikace experimentu in situ*

Po vyhodnocení získaných dat byla pro aplikaci metody fytoextrakce použita zemina A. Na základě získaných poznatků z tohoto pokusu byly nastaveny podmínky cílového výzkumu disertační práce. Popis aplikace experimentu *in situ* je uveden v následující kapitole (viz Kapitola 8. 2).

### *8.2 Použití metody fytoextrakce in situ*

Na základě vyhodnocení dat získaných předběžným experimentem byla vybrána zemina, na které byla provedena fytoextrakce toxických prvků pomocí technického konopí. Samotný experiment proběhl v období červenec – září 2014 na pozemcích společnosti AGRITEC , výzkum, šlechtění a služby, s.r.o., která má s pěstováním kulturních plodin dlouholeté zkušenosti.

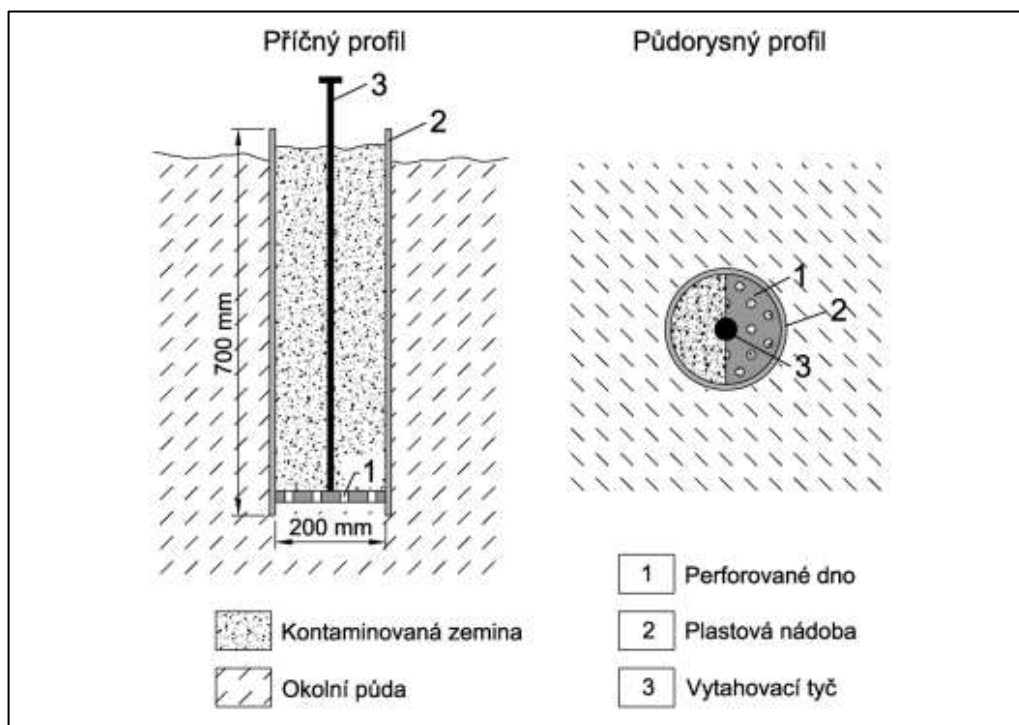
#### *Postup provedení experimentu*

Zemina byla z místa odběru – průmyslový brownfield - převezena do zemědělské dílny, kde byla bezprostředně homogenizována a následně připravena pro její použití. Homogenní materiál byl převezen na výsadbový pozemek, kde jsou trvale do země zapuštěny plastové nádoby (viz Obrázek č 20). Tyto plastové nádoby o objemu 22 dm<sup>3</sup> byly naplněny kontaminovanou zeminou (viz Obrázek č. 21) a následně osazeny semeny *Cannabis sativa* L. Na povrch zeminy se semeny technického konopí byla jemně nasypána vrstva písku, aby nedošlo k jejich zvržení vzduchem (viz Obrázek č. 22). Během experimentu byly simulovány přirozené polní podmínky. Bylo testováno několik odrůd technického konopí. Během vegetační doby u všech rostlin, jednotlivých variet, došlo k výrazné inhibici jejich vývoje a růstu. Pouze několik rostlin jediné odrůdy technického konopí – Carmagnola – prokázala schopnost růstu na takto kontaminované půdě, do formy dospělého jedince. Z tohoto důvodu se veškeré výsledky týkají právě této jedné vypěstované odrůdy.

Charakteristika stanoviště, na kterém byla technologie fytoextrakce toxických prvků z půdy provedena, je uveden v Příloze č. 4 (viz Příloha č. 4).



Obrázek č. 20: Výsadba užité plodiny *Cannabis sativa* L. na pozemcích společnosti AGRITEC, výzkum, šlechtění a služby s. r. o. (foto: Macečková)



Obrázek č. 21: Schéma do země zapuštěné plastové nádoby pro pěstování konopí



Obrázek č. 22: Konečná úprava povrchu zeminy při zahájení fytoextrakce (foto: Macečková)

#### *Vyhodnocení aplikace technologie fytoextrakce in situ*

Rostliny technického konopí (*Cannabis sativa* L.) – odrůdy Carmagnola – prokázaly schopny růstu na vybraném druhu kontaminované zeminy, odebrané z průmyslového brownfields.

Všechny výsledky provedených rozborů odebrané zeminy a rostlinného materiálu jsou společně s jejich vyhodnocením uvedeny v následujících kapitolách (viz Kapitola 9 a Kapitola 10).

## 9 Analýza zeminy

Pro posouzení byla použita zemina, která byla odebrána na území průmyslového brownfieldu. Protože se jedná o reálně znečištěnou zeminu, bylo nutné ji podrobně analyzovat a zjistit tak stupeň a povahu její kontaminace. Informace o povaze znečištění jsou také důležité při výběru vhodné rostliny pro aplikaci fytoremediace, což platí zejména pro zjištění, jsou-li v půdě přítomné kontaminanty, které je rostlina schopna akumulovat.

Cílem praktické části disertační práce je prokázat schopnost akumulace toxických kovů v rostlině technického konopí (*Cannabis sativa* L.), proto jsou ve výsledcích analýz od této kapitoly dále interpretovány výhradně výsledky přítomnosti a chování právě těchto anorganických látek.

Pro získání znalostí o vlastnostech zeminy - zejména chemických - pro účely aplikace fytoextrakční technologie byla odebraná zemina analyzována a hodnocena několika způsoby, které se dají rozdělit do třech základních kroků:

- Hodnocení nebezpečnosti zeminy podle Vyhlášky č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně Vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady ve znění pozdějších předpisů (dále jen Vyhláška č. 295/2005 Sb.)
- Hodnocení znečištění zeminy podle metodického pokynu Ministerstva životního prostředí – Kritéria znečištění zemin a podzemní vody z roku 1996
- Stanovení biodostupných prvků v zemině pro rostliny sekvenční extrakcí podle Tessiera

Použité analytické metody pro stanovení koncentrací kovů v zemině byly vybrány na základě předběžné predikce přítomnosti kovů vzhledem k povaze úložiště zeminy. Aby bylo dosaženo, co nejpřesnějších výsledků je nutné kombinovat analytické metody na základě jejich citlivosti, které se pro jednotlivé prvky, resp. kovy liší. Všechny použité metody jsou vyjmenovány, i s odkazy na jejich postup, v následujícím textu.

Chemické analýzy byly provedeny pod záštitou Centra nanotechnologií – Vysoké školy báňské – TU Ostrava, oddělení anorganické analýzy.

### **9.1 Hodnocení nebezpečnosti zeminy z pohledu Vyhlášky č. 294/2005 Sb.**

V případě nutnosti odtěžení potenciálně kontaminované zeminy z brownfields – z důvodu jeho budoucího využití - je nutné znát její charakteristiku a stanovit vhodný způsob nakládání s touto zeminou. Při rozhodnutí o odstranění zeminy z brownfields je možné ji z legislativního pohledu považovat za odpad. Vhodný způsob uložení zeminy na skládku určí její chemický rozbor a následné vyhodnocení výsledků tohoto rozboru spolu se zařazením zeminy do kategorie odpadu. Pro toto hodnocení lze využít Vyhlášku č. 294/2005 Sb. Podle jmenované vyhlášky lze zařadit zeminu do kategorie odpadu, od které se odvíjí způsob a postup nakládání s touto zeminou, resp. možnost uložení zeminy na příslušnou skládku. Pokud by se například jednalo o zeminu charakterizovanou jako nebezpečný odpad, bylo by, z důvodu ochrany lidského zdraví a životního prostředí, nutné zajistit odborné nakládání s touto zeminou. Součástí hodnocení zeminy podle uvedené vyhlášky je také vyhodnocení zda zemina splňuje požadavky na obsah škodlivin pro druhotné využití této zeminy na úpravu povrchu terénu.

Zjištění, je-li odebraná zemina nebezpečným odpadem, se provádí pomocí chemické analýzy vodného výluhu zeminy a následným vyhodnocením výsledků podle Vyhlášky č. 294/2005 Sb. Postup přípravy vodného výluhu je stanoven v Metodickém pokynu pro stanovení vyluhovatelnosti odpadů uvedený v příloze Zpravodaje MŽP, číslo 9 z roku 1998 a je podrobně rozepsán v přílohách práce (viz Příloha č. 5). Připravený vodný výluh je následně analyzován vhodnými analytickými metodami. Výsledky analýzy vodného výluhu (viz Tabulka č. 4) byly získány metodou atomové absorpční spektrometrie (AAS) a emisní spektrometrií s indukčně vázaným plazmatem (ICP – AES), jejichž princip je podrobně popsán v přílohách disertační práce (viz Příloha č. 1). Další použitou analytickou metodou v této části práce je rentgenová fluorescenční spektroskopie sypkého vzorku zeminy (XRFS), která je popsána rovněž v přílohách práce (viz Příloha č. 1). Výsledky získané touto metodou (viz Tabulka č. 4) slouží také k posouzení možností druhotného využití zeminy při úpravě povrchu terénu.

Tabulka č. 4: Výsledek analýzy vodného výluhu odebrané zeminy

Ukazatel	Jednotka	Výsledek
Fenolový index	-	< 0,05
Chloridy	mg/l	7,28
Fluoridy	mg/l	< 1
Sírany	mg/l	827
As	mg/l	< 0,01
Ba	mg/l	< 0,03
Cd	mg/l	0,17
Cr celkový	mg/l	< 0,03
Cu	mg/l	< 0,03
Hg	mg/l	< 0,001
Ni	mg/l	< 0,02
Pb	mg/l	< 0,05
Sb	mg/l	0,044
Se	mg/l	< 0,01
Zn	mg/l	10,4
Mo	mg/l	< 0,03
RL (rozpuštěné látky)	mg/l	1460
pH	mg/l	7,06
Vodivost	mS/m	160

\*Výsledky byly naměřeny metodou AAS, ICP - AES

Hodnotícím kritériem pro zařazení zeminy do kategorie odpadu je určení její výluhové třídy (viz Tabulka č. 5) a následné určení typu skládky, na kterou může být tento odpad uložen. Podle Vyhlášky č. 294/2005 Sb. je výluhovou třídou „množina nejvýše přípustných hodnot koncentrací ukazatelů vybraných škodlivin v prvním vodném výluhu odpadu“. V Tabulce č. 5 jsou uvedeny výsledky analýzy vodného výluhu odebrané zeminy. Hodnoty měřených ukazatelů, které přesahují nejvýše přípustné hodnoty ukazatelů pro jednotlivé třídy vyluhovatelnosti stanovené ve jmenované vyhlášce, jsou v tabulce (viz Tabulka č. 5) zvýrazněny.



Tabulka č. 5: Porovnání výsledků analýzy vodného výluhu odebrané zeminy s nejvýše přípustnými hodnotami ukazatelů pro jednotlivé třídy vyluhovatelnosti stanovené Vyhláškou č. 294/2005 Sb.

Ukazatel	Analýza vodného výluhu odebrané zeminy	Třídy vyluhovatelnosti			
		I	IIa	IIb	III
	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)
Fenolový index	< 0,05	0,1	-	-	-
Chloridy	7,28	80	1500	1500	2 500
Fluoridy	< 1	1	30	15	50
Sírany	827	100	3000	2 000	5 000
As	< 0,01	0,05	2,5	0,2	2,5
Ba	< 0,03	2	30	10	30
Cd	0,17	0,004	0,5	0,1	0,5
Cr celkový	< 0,03	0,05	7	1	7
Cu	< 0,03	0,2	10	5	10
Hg	< 0,001	0,001	0,2	0,02	0,2
Ni	< 0,02	0,04	4	1	4
Pb	< 0,05	0,05	5	1	5
Sb	0,044	0,006	0,5	0,07	0,5
Se	< 0,01	0,01	0,7	0,05	0,7
Zn	10,4	0,4	20	5	20
Mo	< 0,03	0,05	3	1	3
RL (rozpuštěné látky)	1460	400	8 000	6 000	10 000
pH	7,06	-	≥ 6	≥ 6	-

\* Překročené hodnoty v jednotlivých třídách vyluhovatelnosti jsou v tabulce zvýrazněny

Po porovnání jednotlivých parametrů (viz Tabulka č. 5) je možné sledovaný odpad uložit na skládku skupiny **S – ostatní odpad** (S-001). To znamená, že je zeminu možné přijmout na tento typ skládky bez nutnosti provedení zkoušek obsahu škodlivin. Tento výsledek vyplývá z překročení stanovených limitních hodnot posuzovaných ukazatelů ve třídě vyluhovatelnosti **I** a zároveň nedošlo k překročení žádného z ukazatelů



nejvýše přípustné hodnoty uvedené pro výluhovou třídu **Ila**. Čímž, byly splněny podmínky a kritéria pro přijetí odpadu na tento typ skládky stanovené v příloze č. 4 jmenované vyhlášky (viz Příloha č. 6). Dalším hodnotícím kritériem pro použití zeminy na povrchu terénu je hodnocení jeho vodného výluhu v případě třídy vyluhovatelnosti s označením **Ilb**. Překročení třech ukazatelů – kadmiu, selen, pH - ve v této třídě (viz Tabulka č. 5) rovněž znemožňuje využít tuto zeminu pro výše zmiňovaný účel uzavírání skládek.

Vyhláška č. 294/2005 Sb. v příloze č. 10 (viz Příloha č. 7) posuzuje odpad, resp. zeminu rovněž z hlediska jeho druhotného využití při úpravu povrchu terénu. V této příloze vyhláška stanoví „Požadavky na obsah škodlivin v odpadech využívaných na povrch terénu“ (viz Tabulka č. 7). Odpady, resp. zemina jsou sekundárně nejčastěji využívány do rekultivačních vrstev skládek a pro jejich uzavírání, pro umístění do podzemních prostor při výkopových pracích a také jsou využívány při zavážení vytěžených povrchových dolů, lomů a pískoven. Nemohou však být použity při úpravě povrchu zemědělských půd. Výsledky analýzy vysušeného vzorku odebrané zeminy jsou uvedeny v Tabulce č. 6. Hodnoty měřených parametrů, které přesahují nejvýše přípustné koncentrace škodlivin v sušině odpadů - stanovené ve Vyhlášce č. 294/ 2005 Sb. - jsou zvýrazněny v následující tabulce (viz Tabulka č. 7).

Tabulka č. 6: Výsledky analýzy vysušeného vzorku odebrané zeminy

Parametr	Jednotka	Výsledek
V	mg/kg	690
Cr	mg/kg	87
Ni	mg/kg	40
As	mg/kg	390
Cd	mg/kg	72
Pb	% hmot.	0,34

\* Výsledky byly naměřeny metodou XRFs

\*\* Jednotka hmot. % je v tabulce uvedena kvůli vysoké koncentraci prvku v analyzované zemině a při interpretaci výsledku je považována za vhodnější

Hodnoty měřených parametrů, které přesahují nejvýše přípustné koncentrace škodlivin v sušině odpadů - stanovené ve Vyhlášce č. 294/ 2005 Sb. - jsou zvýrazněny v následující tabulce (viz Tabulka č. 7).

Tabulka č. 7: Nejvýše přípustné koncentrace škodlivin v sušině odpadů pro druhotné využití zeminy při úpravě povrchu terénu

Parametr	Limitní hodnoty	Naměřené hodnoty v zemině
	mg/kg sušiny	mg/kg sušiny
V	180	690
Cr	200	87
Ni	80	40
As	10	390
Cd	1	72
Pb	100	3400

\* V tabulce jsou uvedeny pouze posuzované prvky

V analyzované zemině byly limitní hodnoty obsahu kovů překročeny ve čtyřech ze šesti předepsaných mezních hodnot - arsen, kadmium, olovo a vanad - pro evaluaci použitelnosti zeminy na povrchu terénu (viz Tabulka č. 7). Z tabulky je patrné, že pouze chrom a nikl nepřesahuje dané limitní hodnoty, zbytek hodnocených kovů však přesahuje minimálně třikrát požadovanou koncentraci. Olovo, stejně jako arsen je v zemině překročeno dokonce více než desetkrát. Lze tedy konstatovat, že zemina zcela nevyhověla stanoveným limitům ve vyhlášce a není ji možné využít při úpravách na povrchu terénu.

### Shrnutí

Při celkovém hodnocení nebezpečnosti odebrané zeminy lze konstatovat, že po zařazení zeminy do tříd vyluhovatelnosti (viz Tabulka č. 5), zemina nepatří mezi nebezpečný odpad a v případě nutnosti, může být uložena na skládku s označením S - ostatní odpad (S-001) a není potřeba zajistit speciální opatření pro ochranu lidského zdraví a životního prostředí při nakládání s ní. Z výsledků hodnocení možnosti druhotného využití zeminy pro úpravu povrchu terénu jednoznačně vyplývá, že posuzované prvky

několinásobně překročily nejvýše přípustné koncentrace škodlivin v sušině odpadů stanovené ve Vyhlášce č. 294/2005 Sb. a nelze ji v žádném případě k úpravě povrchu terénu využít.

## *9.2 Hodnocení znečištění zeminy podle Metodického pokynu – Kritéria znečištění zemin a podzemní vody z roku 1996*

Metodický pokyn MŽP České republiky pro analýzu rizik kontaminované území ze září roku 2005 doporučuje pro posuzování rizik výskytu znečištění, které představuje ohrožení zdraví člověka nebo jednotlivých složek životního prostředí, používat metodu zpracování analýzy rizik, která je založena na vypracování předběžného koncepčního modelu kontaminovaného území. „Koncepčním modelem jsou definovány předpokládané expoziční cesty od zdroje, resp. ohniska kontaminace k příjemci rizik“ (Metodický pokyn pro analýzu rizik kontaminovaného území 2005). Vzhledem k tomu, že v práci není posuzována konkrétní lokalita ani konkrétní znečištění není nutné vytvářet koncepční model znečištění. Tento fakt je základním předpokladem pro využití metodického pokynu MŽP ČR - Kritéria znečištění zemin a podzemní vody z roku 1996 (dále jen MP 96). I přesto, že je v současnosti tento metodický pokyn neplatný, je stále v praxi běžně používán (Gruntorád 2015).

Metodický pokyn MP 96 stanovil metodu výluhu vzorku zeminy v lučavce královské jako uzanční postup pro získání informací o celkovém obsahu rizikových prvků a těžkých kovů v zemině. Výluh je následně analyzován vhodnou analytickou metodou, kterou byla v tomto případě metod ICP – AES zkontrolovat správnost. Příprava a princip výluhu vzorku zeminy v lučavce královské je popsán v Příloze č. 8 disertační práce (viz Příloha č. 8).

Výsledek analýzy výluhu vzorku zeminy v lučavce královské je uveden v následující tabulce (viz Tabulka č. 8). Porovnání naměřených hodnot se stanovenými kritérii pro posuzování znečištění zeminy (viz Tabulka č. 9) je uvedeno v následujícím textu.

Tabulka č. 8: Výsledky analýzy výluhu vzorku odebrané zeminy v lučavce královské

Parametr	Jednotky	Výsledek
V	mg/kg	41,1
Cu	mg/kg	830
Zn	% hmot.	0,75
Cd	mg/kg	122
Ba	mg/kg	380
Pb	% hmot.	0,18

\*Výsledky byly naměřeny metodou ICP – AES

\*\* V tabulce jsou uvedeny pouze posuzované prvky

\*\*\* Jednotka hmot. % je v tabulce uvedena kvůli vysoké koncentraci prvku v analyzované zemině a při interpretaci výsledku je považována za vhodnější

Hodnocení kontaminovaných zemín je založeno na konceptu hodnocení třech kritérií A, B a C (podrobný popis kritérií viz Příloha č. 9). Kritéria, podle kterých je znečištění zeminy posuzováno, jsou rozdělena do třech kategorií, které je možné stručně definovat následujícím způsobem:

**Kritérium A** - Odpovídá přibližně přirozeným obsahům sledovaných látek s přihlédnutím k mezím detekce používaných analytických metod. Pokud není překročeno kritérium A, nejedná se o znečištění, ale o přirozené obsahy látek.

**Kritérium B** - Umělé kritérium, přibližně aritmetický průměr kritérií A a C. Překročení kritérií B se posuzuje jako znečištění, které může mít vliv na zdraví člověka nebo jednotlivé složky životního prostředí.

**Kritérium C** - Překročení kritéria C představuje znečištění, které může znamenat významné riziko pro člověka a životní prostředí.

Při překročení kritérií B je třeba se znečištěním dále zabývat. Obvykle je třeba provést další průzkum a hodnocení rizik.

V následující tabulce (viz Tabulka č. 9) jsou obsahy jednotlivých látek v zemině a jejich porovnání se zavedenými hodnotami jednotlivých kritérií, podle kterých je možné stanovit míru znečištění zeminy a potenciální riziko pro zdraví člověka a složky životního prostředí. Překročené hodnoty jednotlivých kritérií jsou v tabulce zvýrazněny.

Při určování stupně znečištění zeminy není zvažováno místo jejího uložení. Z tohoto důvodu také není možné hodnotit překročení stanovených hodnot pro kritéria C a to protože není známé plánované užití území. Jedná se proto o orientační vyhodnocení potenciálního rizika pro jednotlivá území.

V následující tabulce (viz Tabulka č. 9) jsou uvedeny naměřené koncentrace prvků v odebrané zemině. Hodnoty, které přesahují limity stanovené pro jednotlivá kritéria, jsou v tabulce zvýrazněny.

Tabulka č. 9: Kritéria pro stanovení znečištění zeminy stanovená podle Metodického pokynu MŽP – Kritéria znečištění zemin a podzemní vody z roku 1996

Toxický kov	Naměřené koncentrace prvku v odebrané zemině (mg/kg)	Kritéria (mg/kg)					
		A	B	C (obyt.)	C (rekr.)	C (prům.)	C (všestr.)
V	21	180	340	450	500	550	-
Cu	424	70	500	600	1000	1500	190
Zn	7539	150	1500	2500	3000	5000	720
Cd	63	0,5	10	20	25	30	12
Ba	195	600	900	1000	2000	2800	625
Pb	939	80	250	300	500	800	300

\* Překročené hodnoty stanovených kritérií jsou v tabulce zvýrazněny

\*\* V tabulce jsou uvedeny pouze posuzované prvky

Z tabulky (viz Tabulka č. 9), je patrné že v případě této zeminy došlo, u několika sledovaných kovů –zinek, kadmium a olovo - k výraznému překročení stanovených kritérií ve všech třech, resp. šesti kategoriích. Měď překročila kritéria A a C pro všestranné užití území. Zinek, kadmium a olovo významně převyšují všechna stanovená kritéria. Pro některé ze sledovaných kovů nejsou stanovena kritéria hodnocení, a proto nejsou dále zvažovány. Ty kovy, které překročily stanovené limity, resp. kritéria jednoznačně poukazují na fakt, že zemina, která byla použita pro experiment, je silně znečištěná a znamená riziko ohrožení lidského zdraví i kvality životního prostředí. Vzhledem k tomu, že se jedná o antropogenní navážku, je nutné zavést takové nápravné opatření, které nejprve zhodnotí technické a ekonomické aspekty možného řešení a poté zajistí vhodný postup pro degradaci tohoto typu znečištění.

#### *Shrnutí*

Měď, zinek, kadmium a olovo mnohonásobně překročili nejvyšší přípustné koncentrace v jednotlivých kritériích. Tyto prvky jsou díky svým vlastnostem považovány za toxické prvky, které mohou ohrozit zdraví člověka a kvalitu jednotlivých složek životního prostředí. Odebranou zeminu lze na základě výsledků chemické analýzy, srovnané s kritérii stanovenými metodickým pokynem MP 96 (viz Tabulka č. 9), jednoznačně vyhodnotit jako zeminu, která vyžaduje provedení hodnocení rizik a návrh opatření na jejich snížení, resp. odstranění. A to zejména z důvodu překročení přípustné koncentrace rizikových prvků v zemině v případě kritéria B, ale především C, kdy znečištění zeminy může být považováno za významné riziko ohrožení zdraví člověka a složek životního prostředí.

### *9.3 Biodostupnost prvků v půdě pro rostliny*

Stanovení celkové koncentrace kovů v půdě neposkytuje informace o jejich biodostupnosti pro akumulaci rostlinami (Oyeyiola *et al.* 2011). Kovy, všeobecně, jsou v půdách přítomny v různých formách a to v závislosti na fyzikálně – chemických vlastnostech okolního prostředí. Toto prostředí může výrazně ovlivnit jejich mobilitu, reaktivitu a dostupnost rostlinám. V případě kontaminace půdy platí přímá úměra mezi vzrůstající koncentrací kovů a jejich potenciální toxicitou pro rostliny. Proto je důležité

determinovat přítomné biodostupné kovy a definovat vztah vůči celkovému obsahu těchto kovů v rostlině. Využití sekvenční extrakce je považováno za vhodnou metodu pro predikci biodostupných prvků, které je rostlina schopna akumulovat. Jednou z prvních a nejvíce využívaných sekvenčních extrakcí je sekvenční extrakce podle Tessiera (viz Příloha č. 1 a Příloha č. 10) (Tessier *et al.* 1979, Menzies *et al.* 2007, Anawar *et al.* 2008).

Sekvenční extrakce podle Tessiera určuje koncentrace prvků vázané v pěti frakcích extrakčních postupů (viz Příloha č. 10). Vzhledem k povaze předkládané práce jsou však zvažovány pouze uvedené první dvě frakce. Jedná se o **ionto-výměnnou** a **uhličitanovou** frakci. Kovy, které jsou vázané v této frakci, jsou snadno uvolnitelné do životního prostředí. Proto jsou považovány za prvky, které jsou biodostupné pro rostliny rostoucí na půdách kontaminovaných toxickými kovy. Postupem podle Tessiera byly extrahovány sledované kovy, které jsou vázány jednak ve výměnné frakci a jednak na uhličitany (viz Tabulka č. 10).

Tabulka č. 10: Analýza vzorku odebrané zeminy sekvenční extrakcí podle Tessiera

Ukazatel	Jednotka	Iontově vyměnitelná frakce	Jednotka	Frakce vázaná na uhličitany
Ba	mg/kg	9,44	mg/kg	2,44
Cd	mg/kg	26	mg/kg	48
Cu	mg/kg	0,27	mg/kg	2,43
Fe	mg/kg	< 0,56	mg/kg	41
Pb	mg/kg	9,36	mg/kg	358
Sr	mg/kg	9,89	mg/kg	14,4
Ta	mg/kg	< 0,56	mg/kg	< 0,63
V	mg/kg	< 0,24	mg/kg	< 0,27
Zn	mg/kg	544	% hmot.	0,66

\* Jednotka hmot. % je v tabulce uvedena kvůli vysoké koncentraci prvku v analyzované zemině a při interpretaci výsledku je považována za vhodnější

Bylo zjištěno, že v ionto-vyměnitelné frakci je ve značné míře vázáno baryum spolu se stronciem a kadmíem. V menší míře byla naměřena koncentrace zinku a olova, ve velmi nízké koncentraci byla zaznamenána přítomnost mědi. Z uhličitanové frakce bylo extrahováno navíc železo, které v první zmíněné frakci nebylo detekováno. Přítomnost ostatních sledovaných kovů – tantal a vanad – nebyla zjištěna ani v jedné frakci, koncentrace těchto prvků byla pod prahem detekčních limitů. Všeobecně lze shrnout, že v uhličitanové frakci je – kromě barya – zřetelný nárůst obsahu všech kovů oproti iontově-vyměnitelné frakci. Tato skutečnost poukazuje na fakt, že všechny tyto prvky jsou v biodostupné formě a rostliny – v závislosti na jejich akumulčních schopnostech - by je měly být schopny akumulovat do své vnitřní struktury.

#### *Shrnutí*

Analýza sekvenční extrakce podle Tessiera prokázala, že ve dvou prvních extrakčních frakcích – ionto – výměnná a uhličitanová – jsou vázány prvky, resp. kovy, které jsou biodostupné pro rostliny. To znamená, že rostlina, která roste na této zemině, by měla být schopna svými akumulčními schopnostmi vázat do své vnitřní struktury následující kovy: baryum, kadmium, měď, železo, olovo, stroncium a zinek.



## **10 Analýza rostlinného materiálu**

Pro vyhodnocení schopnosti technického konopí akumulovat toxické prvky z kontaminované zeminy bylo nutné provést analýzu testovaného rostlinného materiálu ve dvou krocích.

- Prvním krokem byla kvalitativní analýza rostlinného materiálu provedená pomocí skenovací elektronové mikroskopie a energo – disperzní mikroanalýzou. Tato analýza měla jako první ověřit přítomnost toxických kovů v rostlině, resp. v jejich rostlinných orgánech po ukončení procesu fytoextrakce (viz Kapitola 10.1)
- Druhým krokem byla analýza, jejímž principem je kvantitativní detekce toxických kovů v rostlině. Naměřené výsledky mají potvrdit přítomnost prvků zjištěných předchozí metodou a vyjádřit jejich množství na jednotku hmotnosti sušiny (viz Kapitola 10.2).

Kvalitativní a následná kvantitativní analýza technického konopí byla soustředěna především na akumulaci prvků anorganické povahy, resp. toxických kovů. Z tohoto důvodu jsou ve výsledcích následujících kapitol posuzovány pouze tyto prvky.

Popis prvků, které byly posuzovány při analýze rostliny technického konopí a jsou všeobecně považovány za toxické kovy, je uveden v Příloze č. 11 (viz Příloha č. 11). Ve výsledcích mikroanalýzy EDX jsou uvedeny i další prvky – hliník, tantal, titan. Ty jsou ve výsledcích uvedeny zejména, protože nebývají běžnou součástí rostlinných struktur a mohly tak být rostlinou akumulovány z odebrané zeminy.

Veškeré analýzy byly provedeny pod záštitou Centra nanotechnologií – Vysoké školy báňské – TU Ostrava, oddělení anorganické analýzy.

### 10.1 Skenovací elektronová mikroskopie a energo - disperzní mikroanalýza (EDX)

Tato analýza má především kvalitativní význam. Její vyhodnocení má prokázat, zda během růstu rostliny na kontaminované zemině došlo k akumulaci prvků, které byly stanoveny v odebrané zemině. Metoda byla zvolena jako první z důvodu ověření domněnky schopnosti rostliny technického konopí akumulovat toxické prvky z významně kontaminované zeminy. Dalším důvodem byly nižší ekonomické náklady na provedení této analýzy.

Akumulační schopnosti rostliny byly ověřovány pro všechny její části – kořen, stonek, list, semeno. V tabulkách (viz Tabulka č. 11 – Tabulka č. 18) jsou ve sloupci označeném „Wt % - hmotností procento“ uvedeny kvantitativní výsledky analýzy. Tyto výsledky však nemohou být objektivně vyhodnoceny. To především proto, že se jedná o výskyt prvku v konkrétním bodě vybraného vzorku. Tento bod je zvýrazněn v připojených obrázcích analyzovaných vzorků.

První série snímků rostlinného materiálu (viz Tabulka č. 11) by se dala označit jako pilotní a byla mikroskopována skenovacím elektronovým mikroskopem značky PHILIPS XL – 30 v režimu vysokého vakua. Vybrané vzorky byly před započítím mikroskopování předupraveny naprášením jemné vrstvy zlata na jejich povrch.

Postup při pořízení druhé série snímků rostlinných orgánů (viz Tabulka č. 12 až Tabulka č. 18) se odlišoval od první série a to zejména způsobem předúpravy vzorků a režimu, ve kterém probíhalo jejich skenování. Změna ve způsobu manipulace se vzorky neměla žádný vliv na povahu výsledku. Tyto snímky byly pořízeny novějším typem analytického řádkovacího elektronového mikroskopu značky QUANTA 450 FEG. Tento typ elektronového mikroskopu disponuje moderními technologiemi, které díky variabilnímu tlaku v jeho pracovní komoře umožňuje mikroskopovat nevodivé vzorky bez výše zmíněné úpravy, tzv. zvodivění. Tyto snímky vznikly v režimu nízkého vakua. Výhodou, nenaprašování vzorků vrstvou vybraného kovu (Pd, Au aj.), je výrazné rozšíření možností, co se týče následující analýzy daného biologického materiálu pro získání přesnějších informací o jejich chemickém složení.

Energo-disperzní mikroanalýza (EDX), která poskytuje informace o chemickém složení vzorku, resp. konkrétního bodu byla provedena u všech mikroskopovaných vzorků.

V následujících podkapitolách jsou uvedeny výsledky této kvalitativní analýzy provedené na především příčných vzorcích jednotlivých rostlinných orgánů – kořen, stonek, list, semeno.

Počet vzorků, které byly analyzovány, není pro každou rostlinnou část jednotný. A to zejména z důvodu časové náročnosti provedení této analýzy. Při použití této kvalitativní metody je nutné najít na vzorku „zajímavý“ konkrétní bod, který je pouze shlukem částic, odhadnout jeho potenciál a podrobit jej EDX mikroanalýze. Množství snímků a výsledků z EDX však nemá na konečný výsledek analýzy žádný vliv. Průkaznost přítomnosti prvků je zřejmá již z jednoho pokusu měření.

#### **10.1.1 Kořen**

Od nadzemní části rostliny technického konopí byla oddělena kořenová část, ze které byly příčně vyřezány jednotlivé vzorky kořene. Ve sloupci označeném jako „Naměřené hodnoty“ jsou zvýrazněny ty prvky, které jsou považovány jednak za toxické prvky a prvky, které se přirozeně v rostlinných strukturách nevyskytují. Žlutá šipka na obrázku pojmenovaném jako „Výřez vzorku s analyzovaným bodem“ označuje konkrétní bod, který byl analyzován EDX mikroanalýzou.

Pro kvalitativní analýzu byly vybrány dva reprezentativní vzorky kořene rostliny technického konopí (viz Tabulka č. 11 a Tabulka č. 12).

Tabulka č. 11: Vzorek č. 1 - kořen rostliny rostoucí na kontaminované půdě

## Naměřené hodnoty

## Výřez vzorku s analyzovaným bodem

Element	Wt %	At %
C	54.1	66.9
O	28.6	26.6
Na	0.37	0.24
Mg	0.12	0.07
Si	0.60	0.32
P	0.64	0.31
S	0.61	0.28
Cl	2.98	1.25
K	7.48	2.84
Ca	2.63	0.98
Ba	1.82	0.20
Total	100	100

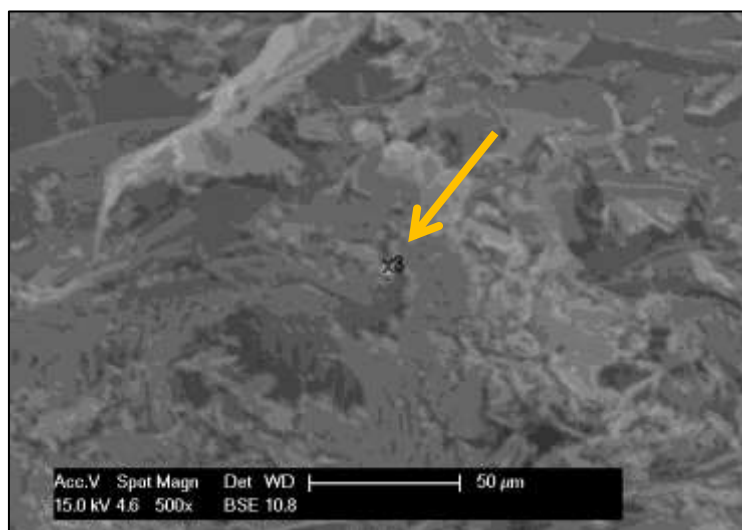
SEM image showing a cross-section of a plant root. A yellow arrow points to analysis point x1. The image displays the internal structure of the root, including the vascular bundle. Technical data: Acc.V 15.0 kV, Spot Magn 4.6, 650x, Det SE, WD 10.8. Scale bar 50 µm.

Element	Wt %	At %
C	64.8	73.4
O	27.7	23.6
Na	0.59	0.35
M	0.29	0.16
Si	0.42	0.20
P	0.49	0.21
S	0.48	0.20
Cl	1.22	0.47
K	2.53	0.88
Ca	1.52	0.52
Total	100	100

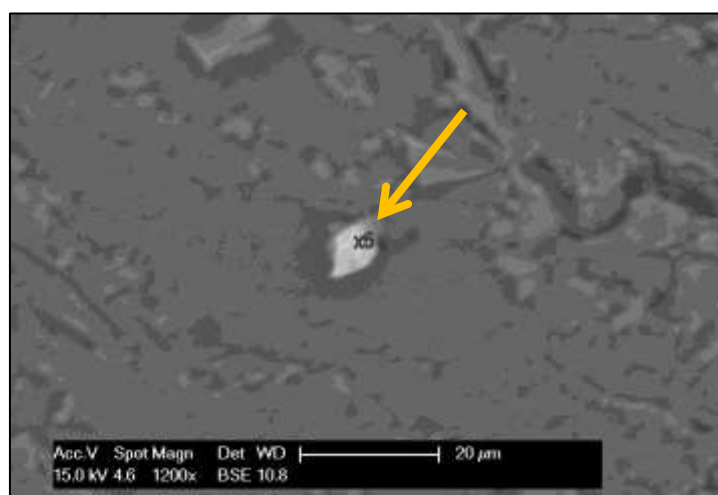
SEM image showing a cross-section of a plant root. A yellow arrow points to analysis point x2. The image displays the internal structure of the root, including the vascular bundle. Technical data: Acc.V 15.0 kV, Spot Magn 4.6, 650x, Det SE, WD 10.9. Scale bar 50 µm.

Pokračování Tabulka č. 11: Vzorek č. 1 - kořen rostliny rostoucí na kontaminované půdě

Element	Wt %	At %
C	37.6	61.5
O	15.6	19.2
Na	0.89	0.76
Mg	0.00	0.00
Si	0.77	0.54
P	0.75	0.47
S	0.78	0.48
Cl	3.07	1.71
K	5.74	2.89
Ca	1.61	0.79
Fe	33.3	11.7
Total	100	100

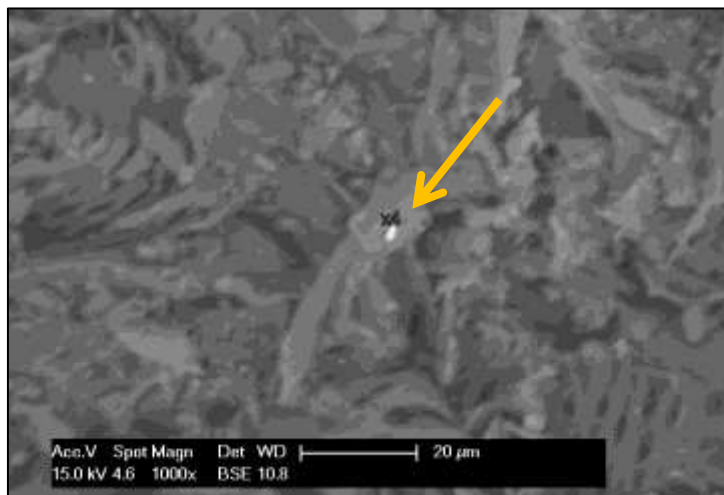


Element	Wt %	At %
C	10.9	23.3
O	30.9	49.8
Fe	58.2	26.9
Total	100	100



Pokračování Tabulka č. 11: Vzorek č. 1 - kořen rostliny rostoucí na kontaminované půdě

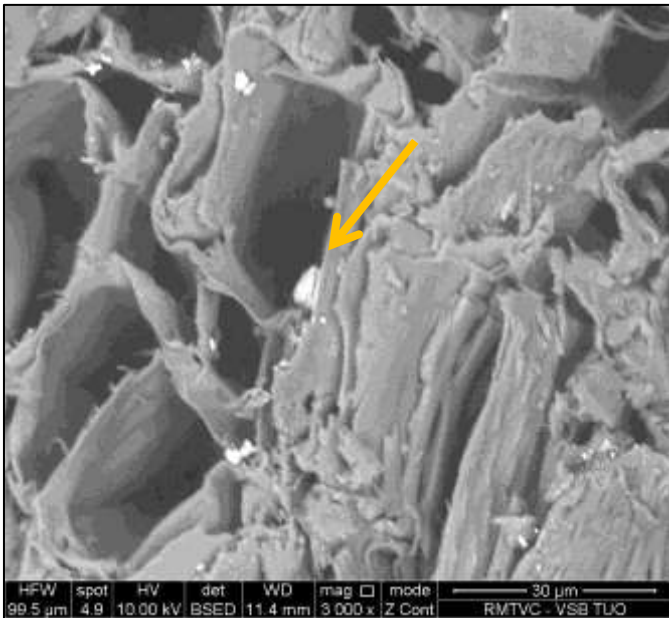
Element	Wt %	At %
C	51.2	71.4
O	20.2	21.1
Na	0.67	0.49
Mg	0.28	0.19
Si	0.43	0.25
P	0.46	0.25
S	3.91	2.05
Cl	1.22	0.58
K	2.53	1.08
Ca	0.71	0.30
Ba	18.5	2.3
Total	100	100

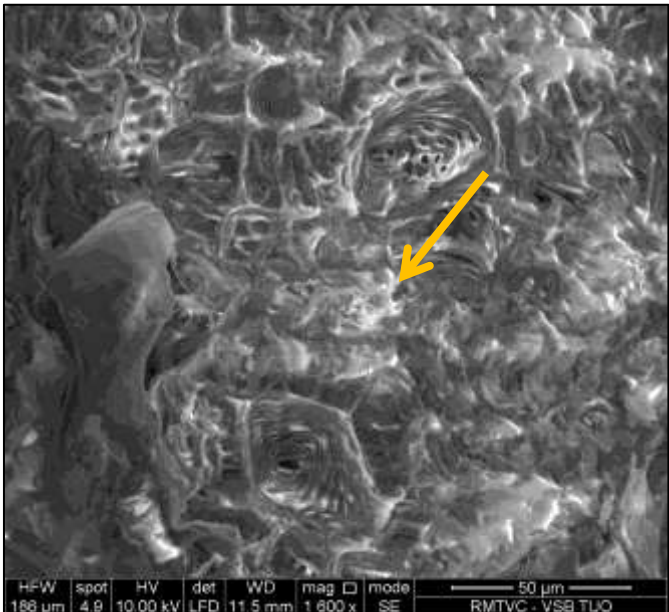


\* Žlutá šipka označuje konkrétní bod analyzovaný metodou EDX

\*\*Fotografie vzorku byla pořízena SEM značky PHILIPS XL - 30

Tabulka č. 12: Vzorek č. 2 - kořen rostliny rostoucí na kontaminované půdě

Naměřené hodnoty			Výřez vzorku s analyzovaným bodem	
Element	Wt %	At %		
C	45.3	58.7		
O	35.7	34.7		
Fe	2.94	0.82		
Na	0.88	0.59		
Mg	0.28	0.18		
Al	0.61	0.35		
Si	1.66	0.92		
P	0.37	0.19		
S	2.00	0.97		
Cl	0.80	0.35		
K	1.92	0.76		
Ca	2.20	0.85		
Ba	5.31	0.60		
Total	100	100		

Element	Wt %	At %		
C	39	52.3		
O	38.8	39		
Fe	12.6	3.62		
Na	1.22	0.86		
Mg	0.18	0.12		
Al	1.56	0.89		
Si	1.65	0.89		
P	0.65	0.34		
S	0.84	0.42		
Cl	0.83	0.38		
K	1.36	0.56		
Ca	1.50	0.60		
Total	100	100		

\* Žlutá šipka označuje konkrétní bod analyzovaný metodou EDX

\*\*Fotografie vzorku byla pořízena SEM značky QUANTA 450 FEG

### Shrnutí

Kromě základních stavebních prvků rostlinných buněk jako je uhlík, kyslík, sodík a křemík byla ve vzorcích kořene rostliny technického konopí potvrzena přítomnost barya a hliníku. Tyto prvky byly akumulovány do kořenového systému z použité kontaminované zeminy.

- V prvním vzorku kořene byly detekovány následující prvky:
  - Baryum v množství 1,82 hmot. %; 18,5 hmot. %.
- Ve druhém vzorku kořene byly detekovány následující prvky:
  - Baryum v množství 5,31 hmot. %.
  - Hliník v množství 0,61 hmot. %; 1,48 hmot. %.

#### 10.1.2 Stonek

Příčné vzorky stonku byly získány jejich vyřezáním v celé délce stonku. Tabulka č. 26 interpretuje výsledky naměřené ve vzorku podélného řezu stonku, který je ojedinělý. Tento vzorek vznikl mechanickou deformací během jeho přípravy. Pro uvedení srovnání zejména morfologické struktury a způsobu zobrazení prvků v ní byl tento vzorek zahrnut do výsledků analýzy.

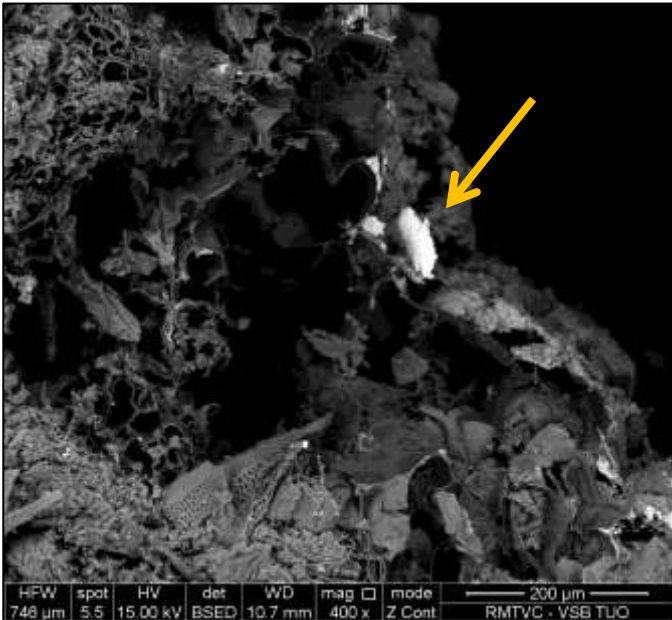
Ve sloupci označeném jako „Naměřené hodnoty“ jsou zvýrazněny ty prvky, které jsou považovány jednak za toxické a prvky, které se přirozeně v rostlinných strukturách nevyskytují. Žlutá šipka na obrázku pojmenovaném jako „Výřez vzorku s analyzovaným bodem“ označuje konkrétní bod, který byl analyzován EDX mikroanalýzou.

Pro kvalitativní analýzu byly vybrány tři reprezentativní vzorky stonku rostliny technického konopí (viz Tabulka č. 13 a Tabulka č. 15).

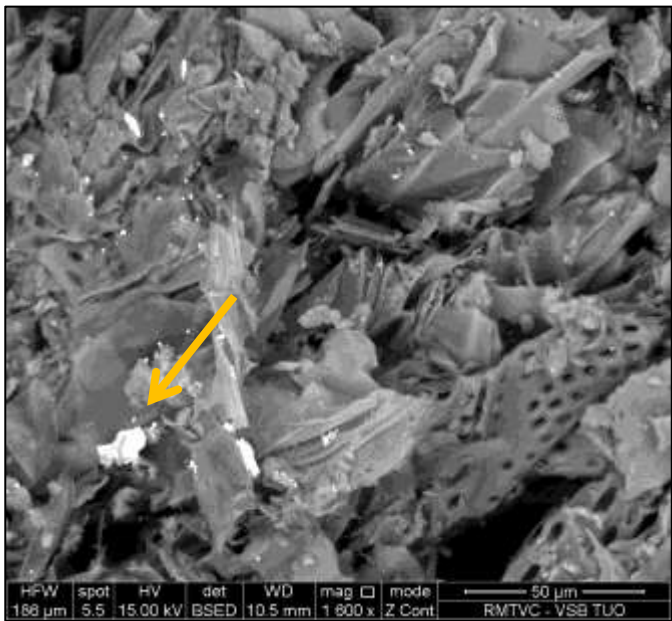


Tabulka č. 13: Vzorek č. 1 - stonek rostliny rostoucí na kontaminované půdě

Naměřené hodnoty			Výřez vzorku s analyzovaným bodem	
Element	Wt %	At %		
C	21.8	34.3		
K	39.7	47.1		
Mg	0.58	0.46		
Si	0.27	0.19		
P	1.06	0.65		
Cl	0.39	0.21		
K	0.66	0.32		
Ca	35.5	16.8		
Total	100	100		

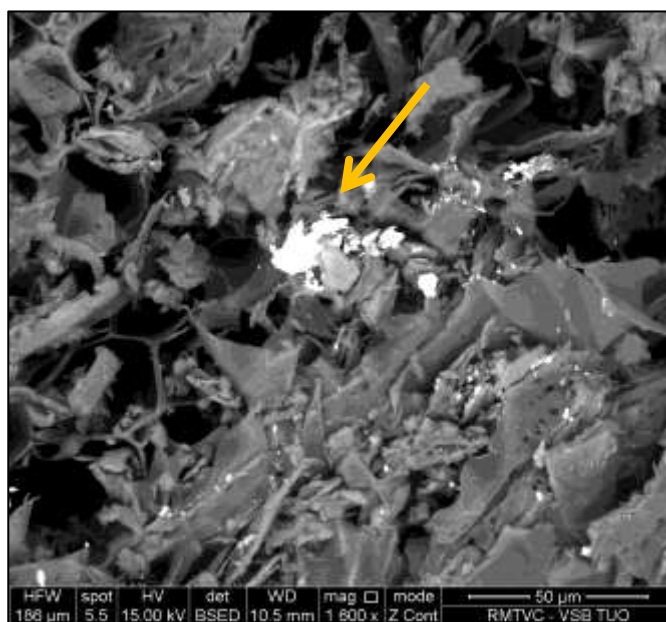


Element	Wt %	At %
C	56.6	72
O	23.9	22.8
Mg	0.25	0.16
Al	0.26	0.15
Si	0.12	0.06
P	0.33	0.16
Cl	0.19	0.08
K	1.17	0.46
Ca	0.65	0.25
Cu	9.44	2.27
Zn	7.08	1.65
Total	100	100

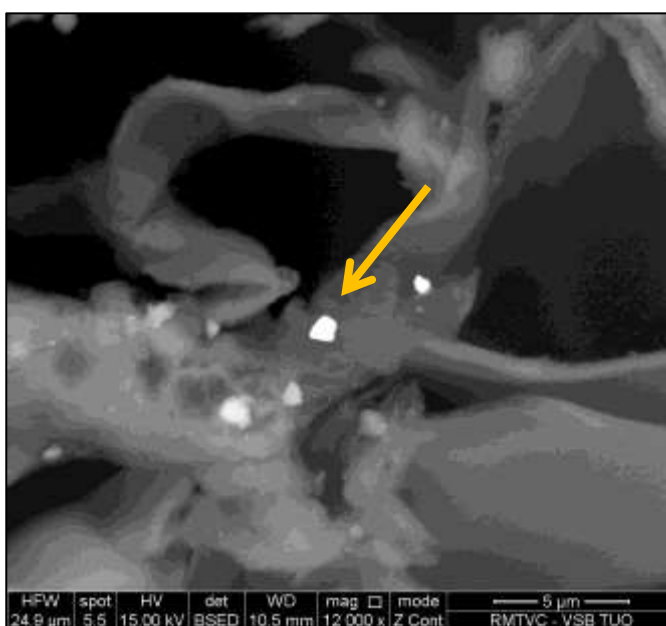


Pokračování Tabulka č. 13 Vzorek č. 1 - stonek rostliny rostoucí na kontaminované půdě

Element	Wt %	At %
C	35.2	65.4
O	11.5	16
Cu	32.7	11.5
Zn	20.7	7.06
Total	100	100

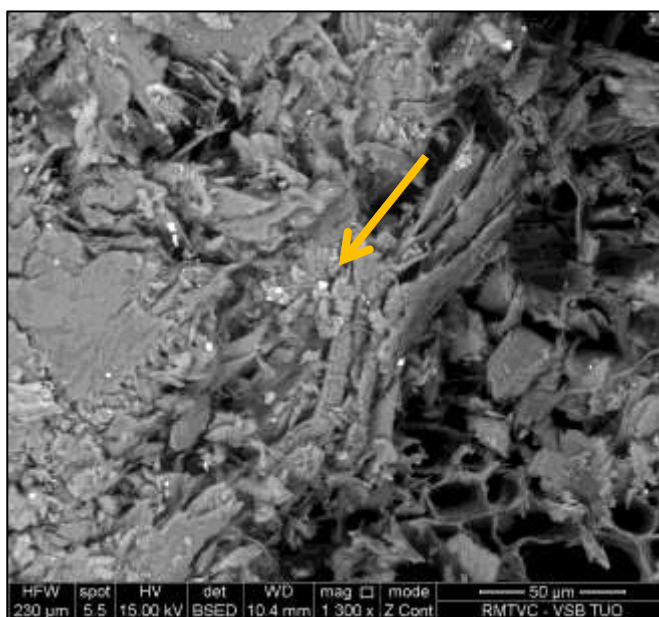


Element	Wt %	At %
C	44.4	59.5
O	34.1	34.3
Ca	0.40	0.16
Mn	0.83	0.24
Fe	20.4	5.87
Total	100	100

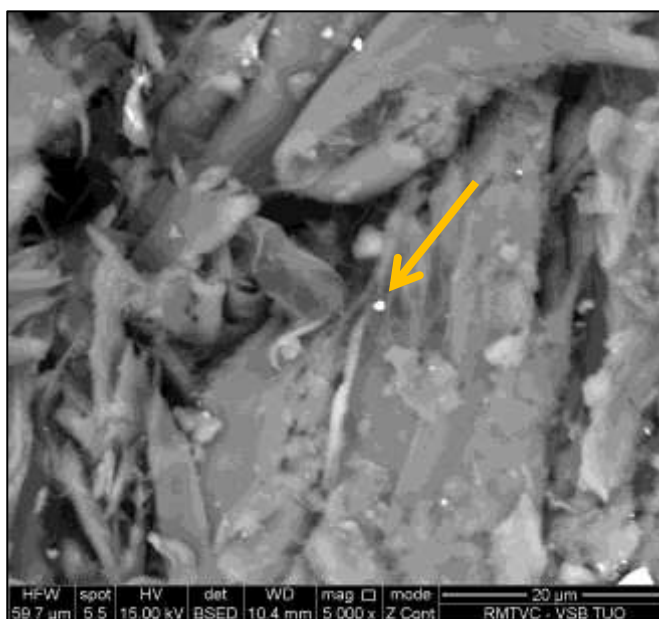


Pokračování Tabulka č. 13: Vzorek č. 1 - stonek rostliny rostoucí na kontaminované půdě

Element	Wt %	At %
C	27.7	45
O	34.2	41.6
Ca	0.54	0.26
Fe	37.6	13.1
Total	100	100



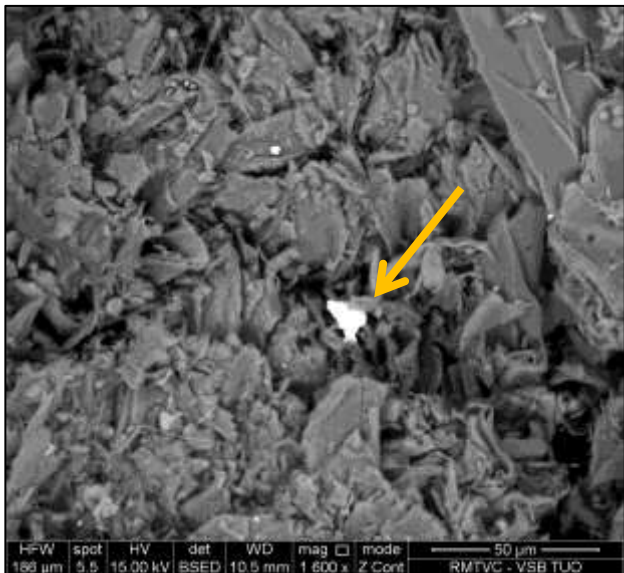
Element	Wt %	At %
C	55.7	65.4
O	36.7	32.4
Si	0.31	0.16
K	0.40	0.15
Ca	0.65	0.23
Ti	3.91	1.15
Fe	2.36	0.60
Total	100	100

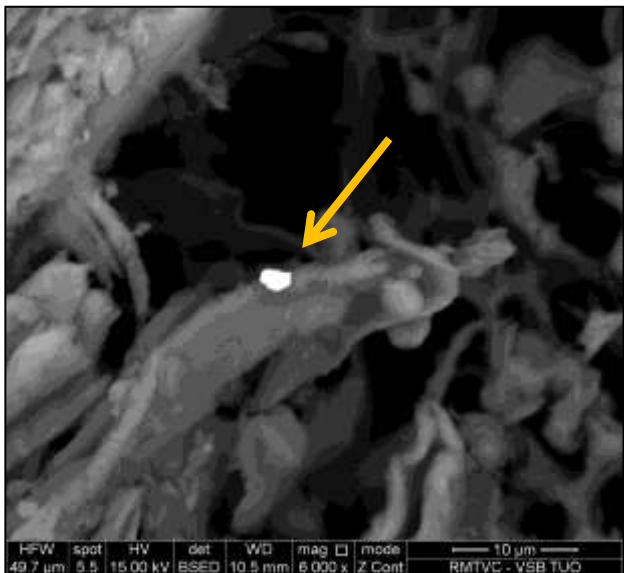


\* Žlutá šipka označuje konkrétní bod analyzovaný metodou EDX

\*\*Fotografie vzorku byla pořízena SEM značky QUANTA 450 FEG

Tabulka č. 14: Vzorek č. 2 - stonek rostliny rostoucí na kontaminované půdě


Naměřené hodnoty			Výřez vzorku s analyzovaným bodem	
Element	Wt %	At %		
C	22.5	37.5		
O	39	48.7		
Fe	38.6	13.8		
Total	100	100		

Element	Wt %	At %	
C	27.8	42.8	
O	40.5	46.8	
Fe	31.7	10.5	
Total	100	100	


\* Žlutá šipka označuje konkrétní bod analyzovaný metodou EDX

\*\*Fotografie vzorku byla pořízena SEM značky QUANTA 450 FEG

Tabulka č. 15: Vzorek č. 3 - stonek rostliny rostoucí na kontaminované půdě - podélný řez

Naměřené hodnoty			Výřez vzorku s analyzovaným bodem	
Element	Wt %	At %		
C	14.8	52.9		
O	9.5	25.3		
Ta	71.2	16.8		
Si	0.00	0.00		
Cl	0.6	0.74		
K	1.04	1.14		
Ca	2.90	3.10		
Total	100	100		

HF-W	spot	HV	det	WD	mag	mode	40 µm
124 µm	5.5	15.00 kV	BSED	10.7 mm	2 400 x	Z Cent	RMTVC - VSB TUO

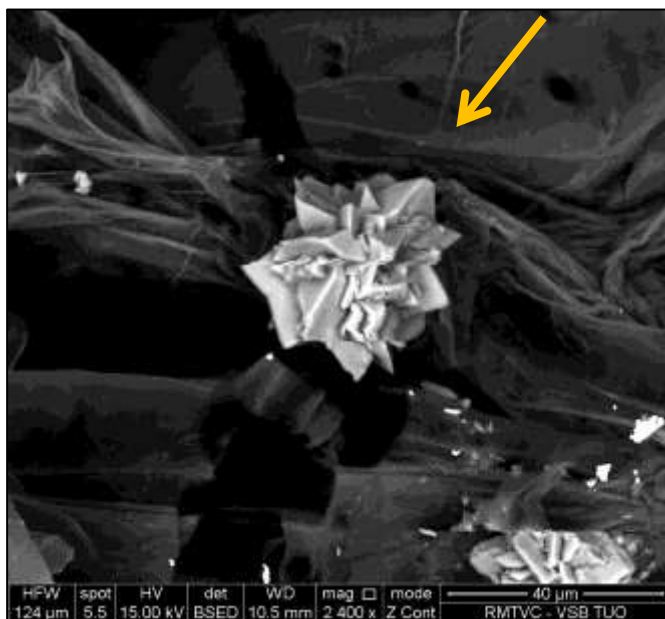
Element	Wt %	At %	
C	34.5	51.6	
O	10.6	11.9	
Al	54.9	36.6	
Total	100	100	

HF-W	spot	HV	det	WD	mag	mode	50 µm
249 µm	5.5	15.00 kV	BSED	10.2 mm	1 200 x	Z Cent	RMTVC - VSB TUO

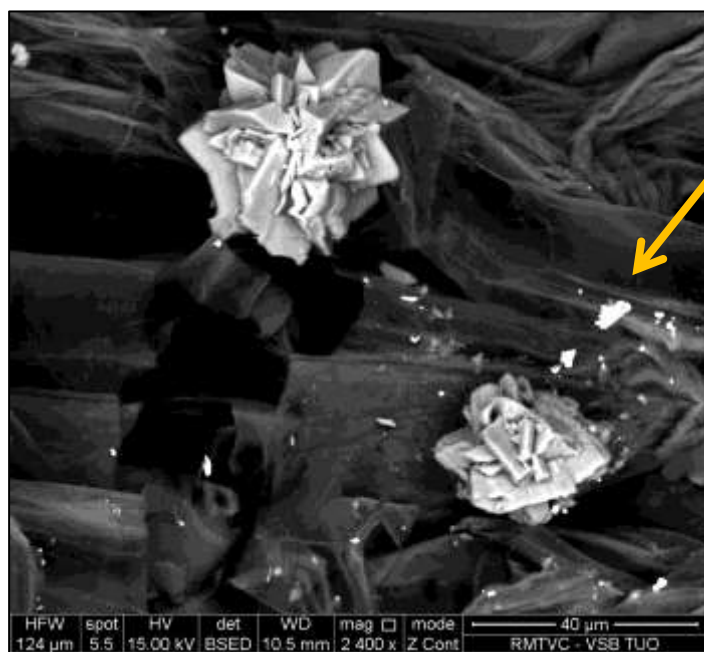


Pokračování Tabulka č. 15: Vzorek č. 3 - stonek rostliny rostoucí na kontaminované půdě - podélný řez

Element	Wt %	At %
C	27.8	39.9
O	44.8	48.3
K	0.76	0.33
Ca	26.6	11.5
Total	100	100



Element	Wt %	At %
C	37.1	60.1
O	21.1	25.7
Al	1.11	0.80
Cl	2.73	1.50
K	0.68	0.34
Ca	0.58	0.28
Cu	36.7	11.3
Total	100	100



\* Žlutá šipka označuje konkrétní bod analyzovaný metodou EDX

\*\*Fotografie vzorku byla pořízena SEM značky QUANTA 450 FEG

### Shrnutí

Kromě základních stavebních prvků rostlinných buněk jako je uhlík, kyslík, sodík a křemík byla ve vzorcích stonku rostliny technického konopí potvrzena přítomnost hliníku, mědi, zinku, titanu a tantalu. Tyto prvky byly pravděpodobně akumulovány do stonku z použité kontaminované zeminy.

- V prvním vzorku stonku byly detekovány následující prvky:
  - Hliník v množství 0,26 hmot. %.
  - Měď v množství 9,44 hmot. %, 32,7 hmot. %.
  - Zinek v množství 7,08 hmot. %, 20,7 hmot. %.
  - Titan v množství 3,91 hmot. %.
- Ve druhém vzorku stonku nebyly detekovány žádné toxické prvky.
- Ve třetím vzorku byly detekovány následující prvky:
  - Hliník v množství 54,9 hmot. %.; 1,11 hmot. %.
  - Měď v množství 36,7 hmot. %.
  - Tantal v množství 71,2 hmot. %.

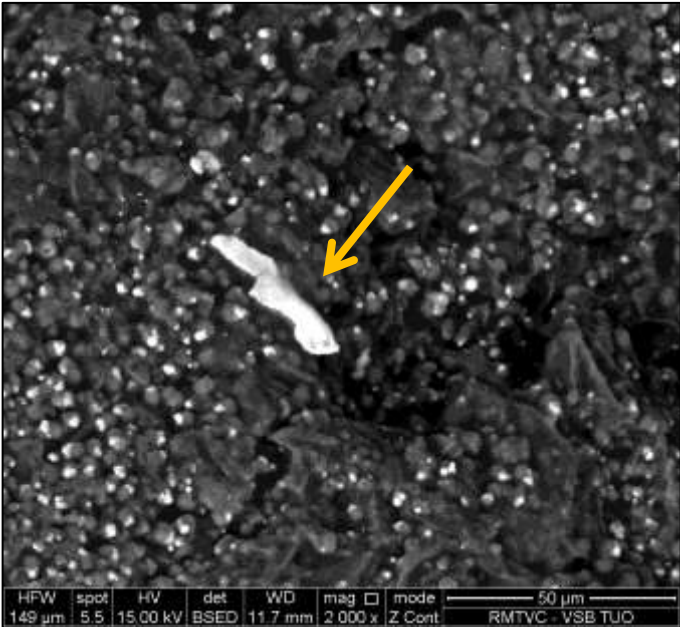
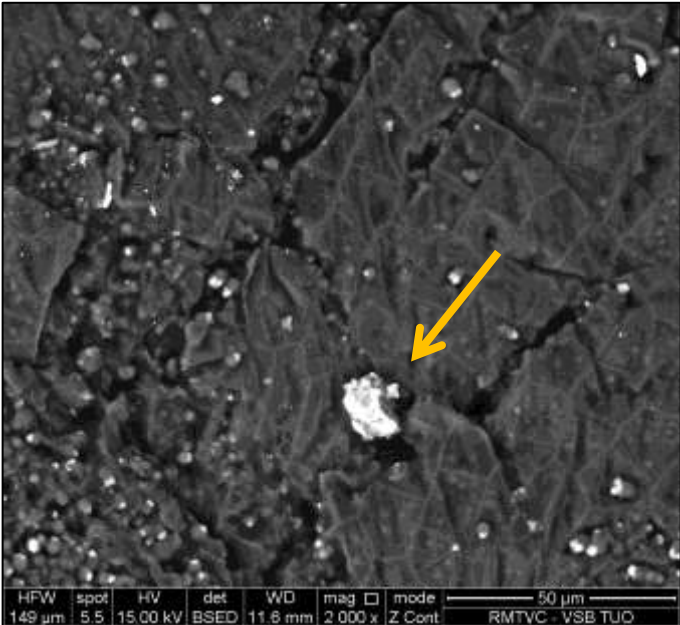
#### 10.1.3 Semeno

Semena technického konopí byly vybrány na základě optického vyhodnocení jejich vitality. Pro získání vzorku semena do mikroskopu, byl proveden příčný řez po celé jeho délce.

Ve sloupci označeném jako „Naměřené hodnoty“ jsou zvýrazněny ty prvky, které jsou považovány jednak za rizikové prvky a prvky, které se přirozeně v rostlinných strukturách nevyskytují. Žlutá šipka na obrázku pojmenovaném jako „Výřez vzorku s analyzovaným bodem“ označuje konkrétní bod, který byl analyzován EDX mikroanalýzou.

Pro kvalitativní analýzu byl vybrán jeden reprezentativní vzorek semene rostliny technického konopí (viz Tabulka č. 16).

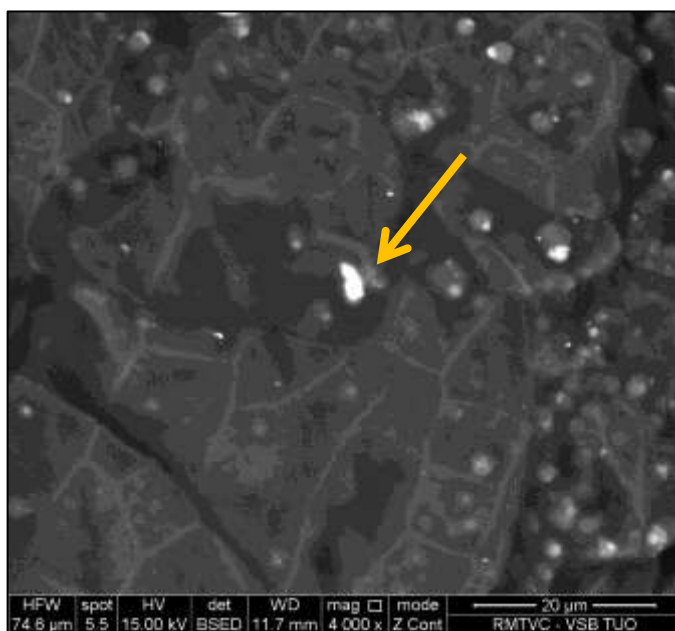
Tabulka č. 16: Vzorek č. 1 - semeno rostliny rostoucí na kontaminované půdě

Naměřené hodnoty			Výřez vzorku s analyzovaným bodem	
<b>Element</b>	<b>Wt %</b>	<b>At %</b>		
C	50.6	66		
O	13.3	13.1		
Al	36.1	21		
Total	100	100		
<b>Element</b>	<b>Wt %</b>	<b>At %</b>		
C	60.4	75.3		
O	18.4	17.3		
Mg	1.3	0.8		
Al	0.41	0.2		
Si	3.31	1.77		
P	0.53	0.26		
Cl	0.21	0.09		
K	0.71	0.27		
Ca	0.54	0.20		
Fe	14.2	3.82		
Total	100	100		



Pokračování Tabulka č. 16: Vzorek č. 1 - semeno rostliny rostoucí na kontaminované půdě

Element	Wt %	At %
C	59.9	82.1
O	9.7	10.0
P	0.31	0.17
S	0.19	0.10
K	0.24	0.10
Cu	16.8	4.34
Zn	12.9	3.24
Total	100	100



\* Žlutá šipka označuje konkrétní bod analyzovaný metodou EDX

\*\*Fotografie vzorku byla pořízena SEM značky QUANTA 450 FEG

### Shrnutí

Kromě základních stavebních prvků rostlinných buněk jako je uhlík, kyslík, sodík a křemík byla ve vzorku semene rostliny technického konopí potvrzena přítomnost hliníku, mědi a zinku. Tyto prvky byly pravděpodobně akumulovány do stonku z použité kontaminované zeminy.

- V prvním vzorku semene byly detekovány následující prvky:
  - Hliník v množství 36,1 hmot. %; 0,41 hmot. %.
  - Měď v množství 16,8 hmot. %.
  - Zinek v množství 12,9 hmot. %.

#### **10.1.4 List**

Výsledky kvalitativní analýzy vzorku listu rostliny se odlišují od všech předchozích a to způsobem snímání vzorků. Vzorky byly analyzovány pouze na jejich povrchu, nejedná se tedy o příčný řez rostlinným orgánem, jako je tomu u ostatních vzorků. Způsob snímání byl uzpůsoben struktuře listu. Z preparátu nebylo možné vyříznout příčný nebo podélný vzorek a proto musel být na terčík, vkládaný do mikroskopu, umístěn vzorek, který byl od celé části listu mechanicky odtržen. Fakt, že je vzorek analyzován pouze na jeho povrchu potvrzuje přítomnost trichomů – dlouhý výčnělek na pokožce rostlin, vznikající z pokožkových buněk rostlin – které jsou na obrázcích viditelné.

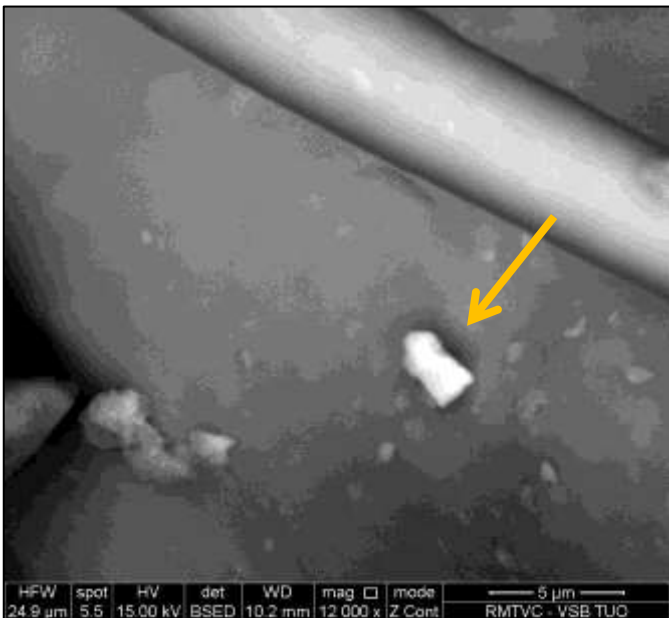
Výsledky mikroanalýzy EDX neprokazují, jestli byly prvky akumulovány do vnitřní struktury této rostlinné části. Poukazují pouze na přítomnost prvků, které pravděpodobně ulpěly na povrchu těchto vzorků a to zřejmě díky zvržení prachových částic zeminy. Toto tvrzení dokazuje porovnání přítomnosti prvků na listu rostliny, která byla pěstována na kontaminované zemině (viz Tabulka č. 17) a rostliny, která byla pěstována na kontrolním substrátu (viz Tabulka č. 18).

Z uvedených důvodů není možné díky EDX mikroanalýze prokázat akumulaci prvků do vnitřní struktury rostliny a je nutné provést podrobnější kvantitativní analýzu organického materiálu.

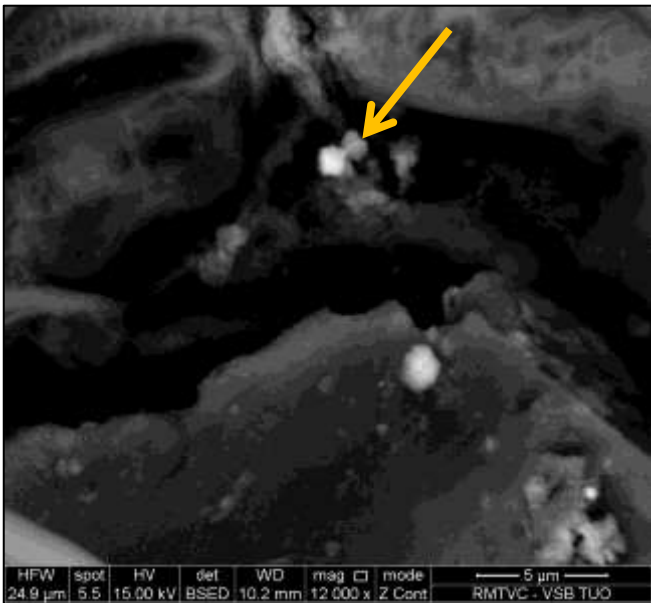
Ve sloupci označeném jako „Naměřené hodnoty“ jsou zvýrazněny ty prvky, které jsou považovány jednak za rizikové prvky a prvky, které se přirozeně v rostlinných strukturách nevyskytují. Žlutá šipka na obrázku pojmenovaném jako „Výřez vzorku s analyzovaným bodem“ označuje konkrétní bod, který byl analyzován EDX mikroanalýzou.

Pro kvalitativní analýzu byl vybrán jeden vzorek listu rostliny technického konopí, která rostla na kontaminované zemině (viz Tabulka č. 17) a jeden vzorek listu rostliny, která rostla na kontrolním substrátu (viz Tabulka č. 18), který není nijak znečištěn.

Tabulka č. 17: Vzorek č. 1 - list rostliny rostoucí na kontaminované půdě

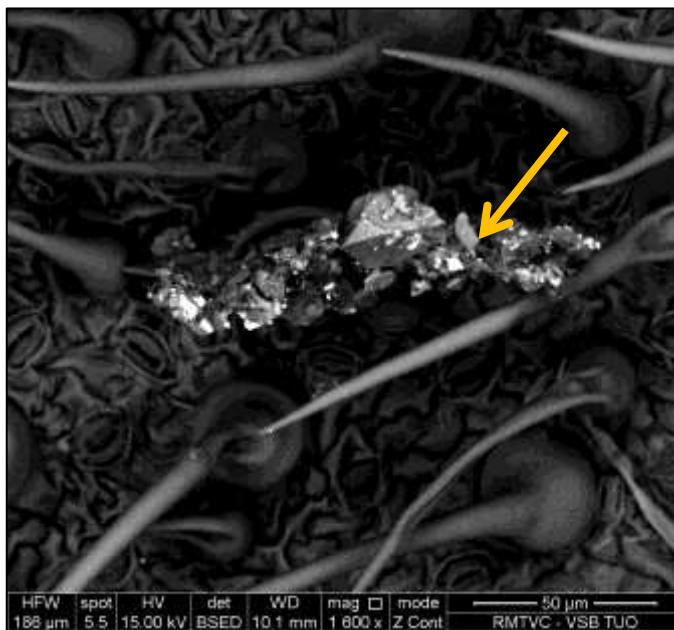
Naměřené hodnoty			Výřez vzorku s analyzovaným bodem
<b>Element</b>	<b>Wt %</b>	<b>At %</b>	
C	25.5	37.1	
O	40.8	44.6	
Na	0.37	0.28	
Mg	3.80	2.73	
Al	1.85	1.19	
Si	13.3	8.27	
P	0.13	0.07	
S	0.05	0.03	
Cl	0.34	0.17	
K	0.59	0.26	
Ca	9.37	4.08	
Ti	0.53	0.19	
Fe	3.32	1.04	
Total	100	100	

<b>Element</b>	<b>Wt %</b>	<b>At %</b>	
C	40.3	52.9	
O	37.4	36.8	
Na	0.00	0.00	
Mg	1.63	1.06	
Al	3.42	2.00	
Si	5.61	3.15	
P	0.40	0.20	
S	0.20	0.10	
Cl	0.37	0.16	
K	0.90	0.36	
Ca	4.03	1.58	
Fe	5.74	1.62	
Total	100	100	

Pokračování Tabulka č. 17: Vzorek č. 1 - list rostliny rostoucí na kontaminované půdě

Element	Wt %	At %
C	30.5	46.4
O	33.9	38.8
Na	0.00	0.00
Mg	1.68	1.26
Al	0.51	0.34
Si	6.79	4.42
P	0.11	0.06
S	0.23	0.13
Cl	3.39	1.75
K	0.89	0.42
Ca	1.56	0.71
Ba	0.55	0.07
Fe	0.54	0.18
Zn	19.3	5.41
Total	100	100

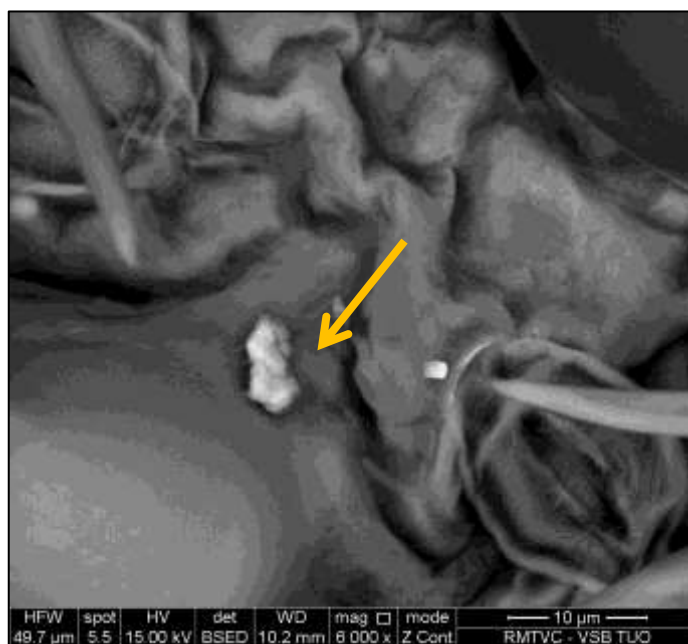


Element	Wt %	At %
C	36.8	52.8
O	25.9	27.9
Na	0.08	0.06
Mg	0.53	0.38
Al	6.06	3.87
Si	13.41	8.22
P	0.25	0.14
S	0.20	0.11
Cl	0.96	0.46
K	7.79	3.43
Ca	3.32	1.42
Ba	1.00	0.13
Fe	1.62	0.50
Cu	2.02	0.55
Total	100	100

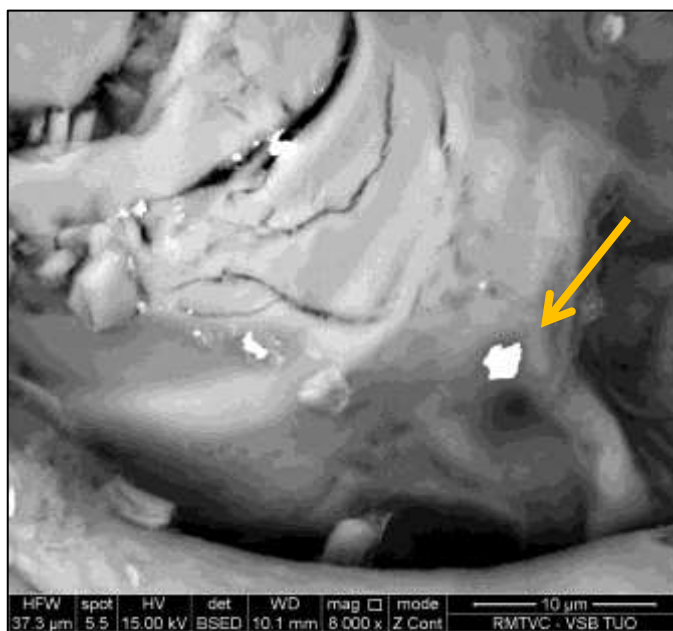


Pokračování Tabulka č. 17: Vzorek č. 1 - list rostliny rostoucí na kontaminované půdě

Element	Wt %	At %
C	27.2	42.3
O	33.4	39.03
Mg	0.17	0.13
Al	0.14	0.10
Si	0.12	0.08
P	0.52	0.32
S	0.38	0.22
Cl	0.75	0.40
K	2.29	1.10
Ca	35.1	16.4
Total	100	100



Element	Wt %	At %
C	46.4	61.2
O	35.9	35.6
Ta	12.7	1.11
Cl	1.68	0.75
K	3.36	1.36
Total	100	100



\* Žlutá šipka označuje konkrétní bod analyzovaný metodou EDX

\*\*Fotografie vzorku byla pořízena SEM značky QUANTA 450 FEG

Tabulka č. 18: Vzorek č. 2 - list rostliny rostoucí na kontrolním substrátu

Naměřené hodnoty			Výřez vzorku s analyzovaným bodem
<b>Element</b>	<b>Wt %</b>	<b>At %</b>	
C	32.8	43.6	
OK	43.2	43.2	
Na	0.22	0.15	
Mg	0.46	0.30	
Al	6.08	3.60	
Si	12.8	7.27	
P	0.28	0.15	
S	0.16	0.08	
Cl	0.16	0.07	
K	1.77	0.72	
Ca	2.14	0.85	
Total	100	100	
<b>Element</b>	<b>Wt %</b>	<b>At %</b>	
C	43.8	58.2	
O	29.8	29.7	
Na	0.09	0.07	
Mg	0.40	0.26	
Al	2.24	1.32	
Si	10.4	5.89	
P	0.50	0.26	
S	0.25	0.13	
Cl	0.15	0.07	
K	2.16	0.88	
Ca	3.30	1.32	
Fe	4.08	1.17	
Zn	2.90	0.71	
Total	100	100	

\* Žlutá šipka označuje konkrétní bod analyzovaný metodou EDX

\*\*Fotografie vzorku byla pořízena SEM značky QUANTA 450 FEG

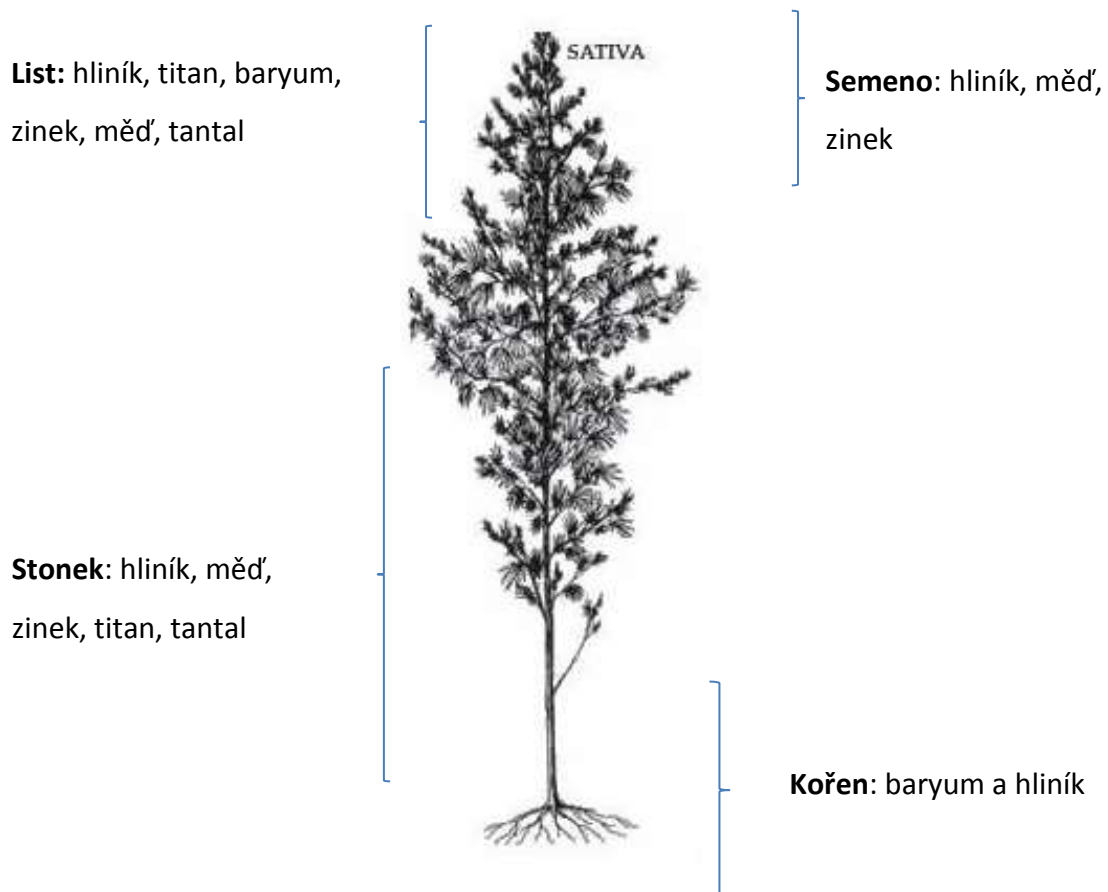
### Shrnutí

Kromě základních stavebních prvků rostlinných buněk jako je uhlík, kyslík, sodík a křemík byla na povrchu vzorku listu rostliny technického konopí potvrzena přítomnost hliníku, mědi, zinku, bary, a tantalu. Tyto prvky byly pravděpodobně akumulovány do stonku z použité kontaminované zeminy.

- Na povrchu prvního vzorku listu byly detekovány následující prvky:
  - Baryum v množství 0,55 hmot. %; 1 hmot. %.
  - Hliník v množství 1,85 hmot. %; 3,42 hmot. %; 0,51 hmot. %; 6,06 hmot. %, 0,14 hmot. %.
  - Měď v množství 2,02 hmot. %.
  - Zinek v množství 19,33 hmot. %.
  - Tantal v množství 12,7 hmot. %.
- Na povrchu druhého vzorku listu byly detekovány následující prvky:
  - Hliník v množství 6,08 hmot. %; 2,24 hmot. %.
  - Zinek v množství 2,90 hmot. %.

### *Distribuce prvků v rostlině technického konopí*

Následující schéma (viz Obrázek č. 23) je všeobecným vyhodnocením kvalitativní analýzy jednotlivých částí rostliny technického konopí. Souhrnně popisuje distribuci a přítomnost vybraných rizikových prvků v jednotlivých částech rostliny.



Obrázek č. 23: Distribuce prvků v rostlině technického konopí



## **10.2 Chemická analýza rostlinné materiálu**

Chemická analýza rostlinného materiálu byla provedena pod záštitou společnosti AGRITEC, výzkum, šlechtění a služby, s.r.o.

Chemická analýza má kvantitativní povahu a interpretuje obsah prvků detekovaných v celé rostlině technického konopí, která rostla na kontaminovaném substrátu. Současně, za předpokladu použití vhodných analytických metod, by měla kvantitativně vyjádřit předchozí kvalitativní analýzu materiálu.

Výsledky této analýzy byly získány analytickou metodou atomové absorpční spektrometrie (viz Příloha č. 1). Tato metoda není vhodná pro stanovení všech prvků, proto zde není uvedeno například baryum nebo tantal. Pro tyto dva ukazatele je nutné zvolit vhodnější metodu s citlivější detekcí prvků této povahy, jako je například metoda ICP - AES (viz Příloha č. 1). Vzhledem k nedostatku finančních prostředků byla vybrána právě metoda AAS.

V následující tabulce (viz Tabulka č. 19) jsou uvedeny obsahy jednotlivých prvků, které byly naměřeny v odrůdě technického konopí s názvem Carmagnola. Tyto výsledky platí pro stanovení obsahu prvků v celé rostlině. Kvůli nedostatku organického materiálu pro analýzu mají tyto výsledky spíše orientační charakter a to zejména pro kvantitativní stanovení koncentrace zinku.

Tabulka č. 19: Obsah prvků naměřených v rostlině technického konopí

Ukazatel	Jednotka	Výsledek
Zn	% hmot.	0,16
Cu	mg/kg	57,7
Fe	mg/kg	549
Cd	mg/kg	38,1
Pb	mg/kg	17,7
Co	mg/kg	1,36
Mo	mg/kg	1,78
Se	mg/kg	9,32
Mg	mg/kg	0,59

\* V tabulce jsou zvýrazněny toxické prvky

\*\* Jednotka hmot. % je v tabulce uvedena kvůli vysoké koncentraci prvku v analyzované zemině a při interpretaci výsledku je považována za vhodnější

Chemický rozbor rostlinného materiálu prokázal akumulaci sledovaných toxických prvků, tedy zinku, mědi, kadmia a olova. Prvky byly akumulovány postupně takto zinek (1690 mg/kg) > železo (549 mg/kg) > měď (57,7 mg/kg) > kadmium (38,1 mg/kg) > olovo (17,7 mg/kg) > selen (9,32 mg/kg) > molybden (1,78 mg/kg) > kobalt (1,36 mg/kg) > hořčík (0,59 mg/kg). Pouze však čtyři z těchto prvků, které jsou v Tabulce č. 19 zvýrazněny, jsou považovány za toxické prvky.

### Shrnutí

Výsledky chemického rozboru rostliny technického konopí prokázaly přítomnost čtyř rizikových prvků – zinek (1690 mg/kg), měď (57,7 mg/kg), kadmium (38,1 mg/kg) a olovo (17,7 mg/kg) v její struktuře. Závěrem tedy lze konstatovat, že technické konopí bylo schopno akumulovat naměřené toxické kovy z kontaminovaného substrátu.

## 11 Závěr

Předkládaná disertační práce Technické aspekty regenerace brownfields prezentuje ověření možnosti využití sanační technologie s názvem fytoextractce, resp. fytoextrakce toxických prvků z půdy pomocí využití technického konopí (*Cannabis sativa* L.). Zemina, která byla v praktické části práce použita, byla odebrána z průmyslového brownfields.

Postup při řešení praktické části disertační práce - posouzení možnosti aplikace metody fytoextrakce toxických prvků z půd pomocí technického konopí - lze popsat v následujících krocích:

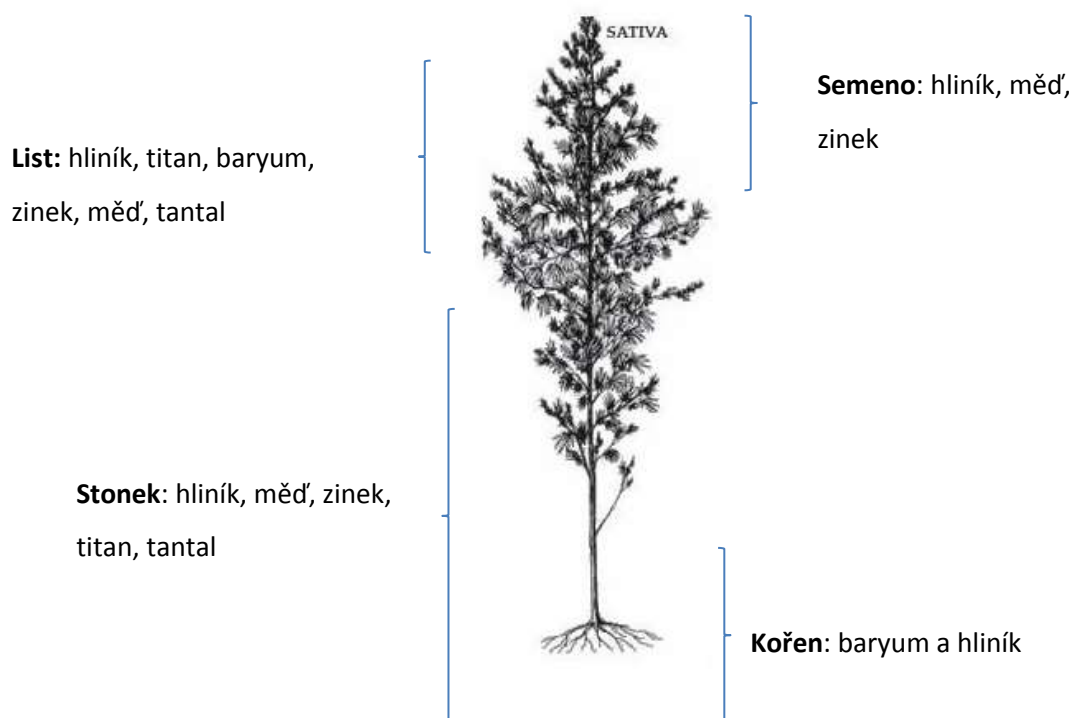
- Výběr vhodného druhu zeminy, na kterém byla provedena fytoextrakce vybraných prvků pomocí technického konopí proběhl na základě výsledků předběžného laboratorního experimentu popsaného v Kapitole 8.1. V této první části byla posuzována schopnost technického konopí růst na dvou typech odebrané zeminy. Ta zemina, na které byl růst rostlin úspěšný, byla vybrána pro aplikaci cílového pokusu.
- Na vybraném druhu zeminy byl započat experiment *aplikace technologie fytoextrakce in situ*. Ten proběhl na pozemcích společnosti AGRITEC výzkum, šlechtění a služby, s.r.o. v období červen – září 2014. Průběh pokusu a způsob aplikace technologie fytoextrakce je podrobně popsán v kapitole 8.2. Celý pokus probíhal v přirozených polních podmínkách, tak aby bylo dosaženo co nejobjektivnějších výsledků. To znamená, že během vegetačního období technického konopí nedošlo k žádnému vnějšímu zásahu jako je například umělé zavlažování či hnojení.
- Pro posouzení hypotézy disertační práce: „Ověření možnosti aplikace technologie fytoextractce, resp. fytoextrakce toxických prvků ze znečištěných půd pomocí technického konopí (*Cannabis sativa* L.)“ bylo nutné provést *analýzu jednak odebrané zeminy a jednak vypěstovaného rostlinného materiálu*. Výsledky analytických měření lze interpretovat následovně:

Pro analytická měření byla použita **zemina**, která byla odebrána na území průmyslového brownfieldu. Vzhledem k tomu, že se jedná o reálně znečištěnou zeminu, bylo nutné ji podrobně analyzovat a zjistit povahu její kontaminace. Hodnocení této zeminy proběhlo na třech úrovních:

- *Hodnocení nebezpečnosti zeminy podle Vyhlášky č. 294/2005, ze kterého vyplývá, že v případě nutnosti uložení této zeminy na skládku odpadů je možné s ní nakládat jako s odpadem, který je možné uložit na skládku skupiny S – ostatní odpad (S-001). To znamená, že při manipulaci s touto zeminou není potřeba zajistit speciální opatření pro ochranu lidského zdraví a životního prostředí. Toto hodnocení zahrnuje posouzení možnosti druhotného využití zeminy pro úpravy povrchu terénu. Výsledky analytických měření a jejich vyhodnocení jsou podrobně uvedeny v Kapitole 9.1.*
- *Druhým způsobem hodnocení odebrané zeminy je posouzení znečištění podle Metodického pokynu – Kritéria znečištění zemin a podzemí vody z roku 1996. Na základě výsledků chemické analýzy a jejich porovnání s hodnotami uvedenými v metodickém pokynu vyplývá, že na lokalitě, ze které byla tato zemina odebrána, mohou vzniknout rizika, která mohou být považována za významná ve smyslu ohrožení zdraví člověka a jednotlivých složek životního prostředí. Výsledky analytických měření a jejich vyhodnocení jsou podrobně uvedeny v Kapitole 9.2.*
- *Kovy, které byly naměřeny sekvenční extrakcí podle Tessiera, v prvních dvou extrakčních frakcích – ionto-výměnná a uhličitánová frakce – jsou snadno uvolnitelné do životního prostředí a jsou proto považovány za nejprístupnější pro rostliny. Tato analýza tedy určuje koncentrace vybraných prvků, resp. kovů, které je rostlina schopna z půdy akumulovat. Výsledky analytických měření a jejich vyhodnocení jsou podrobně uvedeny v Kapitole 9.3.*

Po ukončení praktické části disertační práce - aplikace technologie fytoextrakce - byly vypěstované **rostliny technického konopí** podrobeny analýzám, které je možné pro jejich povahu rozdělit na kvalitativní a kvantitativní:

- První kvalitativní analýza byla provedena pomocí skenovacího elektronového mikroskopu společně s jeho zabudovanou funkcí mikroanalýzy označované jako EDX. Této analýze byly podrobeny jednotlivé části orgánů rostliny, ve kterých byly detekovány prvky, které je možné pokládat za ty, které byly akumulovány z odebrané kontaminované zeminy. Distribuci a výčet těchto prvků v rostlině technického konopí lze interpretovat následujícím obrázkem (viz Obrázek č. 24):



Obrázek č. 24: Distribuce prvků akumulovaných v rostlině technického konopí

- *Kvantitativní analýza* rostlinného materiálu – pomocí analytické metody AAS - popisuje obsah prvků v celé rostlině technického konopí, která rostla na kontaminovaném substrátu. Výsledky chemického rozboru rostliny technického konopí prokázaly přítomnost čtyř rizikových kovů – zinek (1690 mg/kg), měď (57,7 mg/kg), kadmium (38,1 mg/kg) a olovo (17,7 mg/kg) v její struktuře.

Kvantitativní analýza biologického materiálu potvrdila přítomnost dvou sledovaných prvků v rostlině – zinek, měď – které byly rovněž detekovány kvalitativní analýzou EDX. Další prvky – například olovo, kadmium – které byly zaznamenány kvantitativní analýzou, nebyly první kvalitativní analýzou v rostlině detekovány. Tento výsledek lze vysvětlit například následující úvahou:

- i. Princip kvalitativní mikroanalýzy EDX, je založen na chemickém rozboru konkrétního bodu zaměřeného na vzorku rostliny. Během této analýzy tedy nebyl zaměřen bod, který ve svém chemickém složení tyto prvky obsahoval.
- ii. Pro kvantitativní určení koncentrace jednotlivých prvků v rostlinném materiálu byla použita metoda AAS, která není zcela vhodná pro měření toxických kovů jako je například baryum – které se objevilo ve výsledcích kvalitativní analýzy. Proto nebylo možné některé kovy touto analýzou detekovat.

Z těchto skutečností vyplývá doporučení provedení kvantitativní analýzy rostlinného materiálu vhodnější analytickou metodou. Tento fakt však neovlivňuje hodnocení schopnosti technického konopí akumulovat některé z toxických kovů.

*Na základě vyhodnocení dat získaných analytickými měření **lze potvrdit** výchozí hypotézu: „Ověření možnosti aplikace technologie fytořemediace, resp. fytoextrakce toxických prvků ze znečištěných půd pomocí technického konopí (*Cannabis sativa* L.)“. Je možné konstatovat, že technologii fytoextrakce toxických prvků, resp. toxických kovů ze znečištěné půdy pomocí technického konopí, lze na tomto konkrétním příkladu znečištěné zeminy použít.*

## **Závěrečná doporučení**

Pro použití technologie prezentované v disertační práci - fytoextrakce toxických prvků, resp. toxických kovů z půdy pomocí technického konopí - v obecné rovině je nutné provést další výzkum na dané téma. Následující experimenty by měly být provedeny analogicky k prezentovanému pokusu, tzn. na zemině s podobným typem znečištění. A to tak, aby bylo možné posoudit působení sekundárních vlivů, jakým je například organické znečištění půdy. Řešení odstranění organického znečištění z půdy nebylo cílem disertační práce, a proto se ho žádný z výsledků práce netýká.

## Literatura

- Ali, H., Khan, E., a Sajad, M. A. 2013. Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere*. **91**(7): 869–881. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.01.075. ISSN 00456535.
- Amaducci, S., Zatta, A., Raffanini, M., a Venturi, G. 2008. Characterisation of hemp (*Cannabis sativa* L.) roots under different growing conditions. *Plant and Soil*. **313**(1–2): 227–235. DOI: 10.1007/s11104-008-9695-0. ISSN 0032-079x.
- Alkorta, I., Hernández-Allica, J., Becerril, J.M., Amezaga, I., Albizu, I., a Garbisu, C. 2004. Recent Findings on the Phytoremediation of Soils Contaminated with Environmentally Toxic Heavy Metals and Metalloids Such as Zinc, Cadmium, Lead, and Arsenic. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. **3**(1): 71–90. DOI: 10.1023/B:RESB.0000040059.70899.3d. ISSN 1569-1705.
- Angelova, V., Ivanova, R., Delibaltova, V., Ivanov, K., Albizu, I., a Garbisu, C. 2004. Bio-accumulation and distribution of heavy metals in fibre crops (flax, cotton and hemp). *Industrial Crops and Products*. **19**(3): 197–205. DOI: 10.1016/j.indcrop.2003.10.001. ISSN 09266690.
- Bergatt, J., a Kolektiv. 2004. Brownfields snadno a lehce. Příručka zejména pro pracovníky a zastupitele obcí. IURS – Institut pro udržitelný rozvoj sídel.
- Bhargava, A., Carmona, F. F., Bhargava, M., Srivastava, S., Albizu, I., a Garbisu, C. 2012. Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. *Journal of Environmental Management*. **105**(3): 197–205. DOI: 10.1016/j.jenvman.2012.04.002. ISSN 03014797.
- Bjelková, M. 2011. Využití přadných rostlin ve fytořemediaci. Doktorská disertační práce. Mendelova univerzita v Brně.
- Bóscá, I. 1999. Chapter 8. Genetic Improvement: Conventional Approaches. *Advances in Hemp Research*. Editor: Paolo Ranalli. The Haworth Press, Inc. ISBN 1-56022-872-5.
- Chaney, R. L. 1983. Plant uptake of inorganic waste. *Land Treatment of Hazardous Waste*, eds. J. E. Parr, P. B. Marsh, J. M. Kla, Noyes Data Corp, Park Ridge II, s. 50–76.
- Chaney, R. L., Malik, M., Li, Y. M., Brown, S. L., Brewer, E. P., Angle, J. S., a Baker, A. J. M. 1997. Phytoremediation of soil metals. *Current Opinion in Biotechnology*. **8**: 279–284. ISSN 0958 – 1669.
- Citterio, S., Santagostino, A., Fumagalli, P., Prato, N., Ranalli, P., a Garbisu, S. 2012. Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. *Plant and Soil*. **256**(2): 243–252. DOI: 10.1023/A:1026113905129. ISSN 0032079x.



- Cunningham, S. D., Berti, W. R., Huang, J. W., Prato, N., Ranalli, P., a Sgorbati, S. 1995. Phytoremediation of contaminated soils. *Trends in Biotechnology*. **13**(9): 393–397. DOI: 10.1016/S0167-7799(00)88987-8. ISSN 01677799.
- de Meijer, E. P. M., van der Kamp, H. J., van Eeuwijk, F. A., Prato, N., Ranalli, P., a Sgorbati, S. 1992. Characterisation of Cannabis accessions with regard to cannabinoid content in relation to other plant characters. *Euphytica*. **62**(3): 187–200. DOI: 10.1007/BF00041753. ISSN 0014-2336.
- Fišar, Z. 2006. Fytokanabinoidy. Chemické listy. **100**: 233–242. ISSN 1213-7103.
- Frankovská, J., Kordík, J., Slaninka, I., Jurkovič, L., Greif, V., Šottník, P., Dananaj, I., Mikita, S., Dercová, K., a Jánová, V. 2010. Atlas sanačných technologií environmentálnych záťaží. Bratislava, Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, 361 s. ISBN 978-80-89343-39-3.
- Garbisu, C., Alkorta, I., van Eeuwijk, F. A., Prato, N., Ranalli, P., a Sgorbati, S. 2001. Phytoextraction: a cost-effective plant-based technology for the removal of metals from the environment. *Bioresource Technology*. **77**(3): 229–236. DOI: 10.1016/S0960-8524(00)00108-5. ISSN 09608524.
- Girdhar, M., Sharma, N. R., Rehman, H., Kumar, A., a Mohan, A. 2014. Comparative assessment for hyperaccumulatory and phytoremediation capability of three wild weeds. *3 Biotech*. **4**(6): 579–589. DOI: 10.1007/s13205-014-0194-0. ISSN 2190-572x.
- Grotenhermen, F., a Karus, M. 1998. Industrial hemp is not marijuana: Comment on the drug potential of fiber Cannabis. *Journal of the International Hemp Association*. **5**(2): 96–101. ISSN 1381-091x.
- Hamby, D. M. 1996. Site remediation techniques susorting environmental restoration activities – a review. *Science of the Total Environemnt*. **3**(3): 203–224. DOI: 10.1016/S0048-9697(96)05264-3. ISSN 0048-9697.
- Honzík, R. 2007. Nové technologické postupy sklizně technického konopí. Metodika pro praxi. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., 28 s. ISBN 978-80-87011-31-7.
- Kocourková, B., Pluháčková, H., a Růžičková, G. 2014. Pěstování speciálních plodin. Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta, 100 s. ISBN 978-80-7509-020-1.
- Kos, B., a Leštan, D. 2004. Soil washing of Pb, Zn and Cd using biodegradable chelator and permeable barriers and iduced phytoextraction by Cannabis sativa. *Plant and Soil*. **263**(1): 43–51. DOI: 10.1023/B:PLSO.0000047724.46413.27. ISSN 0032-079x.
- LEPOB. 2006. Brownfields příručka. Interdisciplinární nástroj zaměřený na problematiku regenerací brownfields. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 91 s. ISBN 80-248-1096-4.

- Lewandowski, I., Schmidt, U., Londo, M., a Faaij, A. 2006. The economic value of the phytoremediation function – Assessed by the example of cadmium remediation by willow (*Salix* ssp). *Agricultural System*. **89**(1): 68–89. DOI: 10.1016/j.agsy.2005.08.004. ISSN 0308521x.
- Liang, H. M., Lin, T. H., Chiou, J. M., a Yeh, K. Ch. 2009. Model evaluation of the phytoextraction potential of heavy metal hyperaccumulators and non-hyperaccumulators. *Environmental Pollution*. **157**(6): 1945–1952. DOI: 10.1016/j.envpol.2008.11.052. ISSN 02697491.
- Linger, P., Müssig, J., Fischer, H., Kobert, J., a Mohan, A. 2002. Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) growing on heavy metal contaminated soil: fibre quality and phytoremediation potential. *Industrial Crops and Products*. **16**(1): 33–42. DOI: 10.1016/S0926-6690(02)00005-5. ISSN 09266690.
- Linger, P., Ostwald, A., a Haensler, J. 2005. Cannabis sativa L. growing on heavy metal contaminated soil: growth, cadmium uptake and photosynthesis. *Biologia Plantarum*. **49**(4): 567–576. DOI: 10.1007/s10535-005-0051-4. ISSN 0006-3134.
- Malik, R. N., Husain, S. Z. a Nazir, I. 2010. Heavy metal contamination and accumulation in soil and wild plant species from insutrial area of Islamabad, Pakistan. *Pakistan journal of botany*. **42**(1): 291–301. ISSN 0556-3321.
- Marchiol, L., Fellet, G., Perosa, D., a Zerbi, G. 2007. Removal of trace metals by Sorghum bicolor and Helianthus annuus in a site polluted by industrial wastes. *Plant Physiology and Biochemistry*. **45**(5): 379–387. DOI: 10.1016/j.plaphy.2007.03.018. ISSN 09819428.
- Meagher, R. 2000. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants. *Current Opinion in Plant Biology*. **3**(2): 153–162. DOI: 10.1016/S1369-5266(99)00054-0. ISSN 13695266.
- Meers, E., Ruttens, A., Hopgood, M., Lesage, E., a Tack, F. M. G. 2005. Potential of Brassica rapa, Cannabis sativa, Helianthus annuus and Zea mays for phytoextraction of heavy metals from calcareous dredged sediment derived soils. *Chemosphere*. **61**(4): 561–572. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2005.02.026. ISSN 00456535.
- Mechtler, K., Bailer, J., a de Hueber, K. 2004. Variations of  $\Delta^9$ -THC content in single plants of hemp varieties. *Industrial Crops and Products*. **19**(1): 19–24. DOI: 10.1016/S0926-6690(03)00077-3. ISSN 09266690.
- Menzies, N. W., Donn, M. J., a Kopittke, P. M. 2007. Evaluation of extractants for estimation of the phytoavailable trace metals in soils. *Environmental Pollution*. **145**(1): 121–130. DOI: 10.1016/j.envpol.2006.03.021. ISSN 02697491.
- Nazir, A., Malik R. N., Ajaib M., Khan N., a Siddiqui M. F. 2011. Hyperaccumulators of heavy metals of industrial areas of Islamabad and Rawalpindi. *Pakistan journal of botany*. **43**(4): 1925–1933. ISSN 0556-3321. 2011.

- Oyeyiola, O. A., Olayinka, K. O., Babajide, I. A. 2011. Comparison of three sequential extraction protocols for the fractionation of potentially toxic metals in coastal sediments. *Environmental Monitoring and Assessment*. **172**(1–4): 319–327. DOI: 10.1007/s10661-010-1336-4. ISSN 0167-6369.
- Petříková, V. 1999. Rostliny pro energetické účely. Česká energetická agentura, Praha, 34 s.
- Pilon-Smits, E. 2005. Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*. **56**: 15–39. DOI: 10.1146/annurev.arplant.56.032604.144214. ISSN 1543–5008. In Souza L. A., Piotto, F. A., Nogueirol, R. C., a Azevedo, R. A. 2013. Use of non-hyperaccumulator plant species for the phytoextraction of heavy metals using chelating agents. *Scientia Agricola*. **70**(4): 290–295.
- R Development Core Team. 2008. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0.
- Rahimi, M., Farhadi R., a Mehdizadeh, R. 2013. Phytoremediation: Using plants to clean up contaminated soils with heavy metals. *International Journal of Agriculture: Research and Review*. **3**(1): 148–152. ISSN 2228-7973.
- Randula, D., Hendrych, J., Kroužek, J., Mašín, P., Kubal, M., a Kochánková, L. 2012. Studium termické desorpce kontaminovaných materiálů s využitím mikrovlnného ohřevu. Sborník konference: Inovativní sanační technologie ve výzkumu a praxi V, Praha, 17. – 18. 2012. Ekomonitor.
- Rascio, N., a Navari-Izzo, F. 2011. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Science*. **180**(2): 169–181. DOI: 10.1016/j.plantsci.2010.08.016. ISSN 01689452.
- Raskin, I., Smith, R. D., a Salt, E. D. 1997. Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment. *Current Opinion in Biotechnology*. **8**(2): 221–226. DOI: 10.1016/S0958-1669(97)80106-1. ISSN 09581669.
- Shi, G., Liu, C., Cui, M., Ma, Y., a Cai, Q. 2012. Cadmium Tolerance and Bioaccumulation of 18 Hemp Accessions. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. **168**(1): 163–173. DOI: 10.1007/s12010-011-9382-0. ISSN 0273-2289.
- SCHWITZGUÉBEL, J. P. 2000. Potential of phytoremediation, an emerging green technology. Ecosystem Service and Sustainable Watershed Management in North China, s. 346–350.
- Small, E., a Marcus, D. 2002. Hemp: A new crop with new uses for North America. In: J. Janick a A. Whipkey (eds.), *Trends in new crops and new uses*. ASHS Press, Alexandria, VA, s. 284–326.
- Soudek, P., Petrová, Š., Vaňková, R., Song, J., a Vaněk, T. 2014. Accumulation of heavy metals using *Sorghum* sp. *Chemosphere*. **104**(1): 15–24. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.09.079. ISSN 00456535.

- Soudek, P., Petrová, Š., Benešová, D., Kotyza, J., a Vaněk, T. 2008. Fytoremediace a možnosti zvýšení jejich účinnosti. *Chemické listy*. **102**: 346–352. ISSN 1213-7103.
- Tessier, A., Campbell, P. G. C., a Bisson, M. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical chemistry*. **51**(7): 844-851. DOI: 10.1021/ac50043a017. ISSN 0003-2700.
- Tlustoš, P., Száková, J., Hrubý, J., Hartman, I., Najmanová, J., Nedělník, J., Pavlíková, D., a Batysta, M. 2006. Removal of As, Cd, Pb, and Zn from contaminated soil by high biomass producing plants. *Plant, Soil and Environment*. **52**(9): 431–423. ISSN 1214-1178.
- Vamerali, T., Bandiera, M., a Mosca, G. 2010. Field crops for phytoremediation of metal-contaminated land. A review. *Environmental Chemistry Letters*. **8**(1): 1–17. DOI: 10.1007/s10311-009-0268-0. ISSN 1610-3653.
- Prasad, M. N. V. a Freitas, H. M. O. 2003. Metal hyperaccumulation in plants - Biodiversity prospecting for phytoremediation technology. *Electronic Journal of Biotechnology*. **6**(3): 285-321. DOI: 10.2225/vol6-issue3-fulltext-6. ISSN 0717-3458.
- Vojvodíková, B., Česelský, J., a Zamarský, V. 2014. Některé spekty územního rozvoje. European Science And Art Publishing, Praha, 80 s. ISBN 978-80-87504-24-6.
- Yang, X., Feng Y., He Z., a Stoffella, P., J. 2005. Molecular mechanisms of heavy metal hyperaccumulation and phytoremediation. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. **18**(4): 339–353. DOI: 10.1016/j.jtemb.2005.02.007. ISSN 0946672x
- Yao, Z., Li J., Xie. H., a Yu, C. 2012. Review on remediation technologies of soil contaminated by heavy metals. *Procedia Environmental Sciences*. **16**(4): 722–729. DOI: 10.1016/j.proenv.2012.10.099. ISSN 18780296.

## **Internetové zdroje**

- CABERNET. Brownfield Definition [online]. Dostupné online na WWW <<http://www.cabernet.org.uk/index.asp?c=1134>> [cit. 2014-04-28].
- Cascardi, L. Hemp (Cannabis sativa L.) as a phytoremediator. Dostupné online na WWW <<http://rydberg.biology.colostate.edu/phytoremediation/2012/Phytoremediation%20with%20hemp%20by%20Laura%20Cascardi.pdf>> [2012-12-06]; [cit. 2015-01-23].
- Kovářová, M., Abrham, Z., Jevič, P., Šedivá, Z. a Kocánová, V. Pěstování a využití energetických a průmyslových plodin. Biom.cz [online]. Dostupné online na WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/pestovani-a-vyuziti-energetickych-a-prumyslovych-plodin>>. [2002-07-10]; [cit. 2015-06-18]. ISSN: 1801-2655.
- United States Environmental Protection Agency. Brownfields Definition [online]. Dostupné online na WWW <<http://epa.gov/brownfields/overview/glossary.htm>> [2001-04-10], [cit. 2014-04-28].
- Kubala, M., J. Burkhad a Březina, M. Dekontaminační technologie [online]. Dostupné online na WWW <<http://old.vscht.cz/uchop/CDmartin/7-souhrnprehl/2.html>>[2002]; [cit. 2014-03-15].
- Regionální Informační Servis. Bývalý vojenský areál – Osoblaha. Dostupné online na www <<http://www.risy.cz/cs/vyhledavace/brownfields/detail?id=8027>> ; [2008]; [cit. 2015-02-15].

## **Normy, nařízení a předpisy**

- Komise evropského společenství. Nařízení Komise (ES) č. 2860/2000. Úřední věstník L 332, 28/12/2000 S. 0063 - 0075.
- Vyhláška Ministerstva životního prostředí č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich používání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady.
- Metodický pokyn Ministerstva životního prostředí pro analýzu rizik kontaminovaného území částka 12, 2005.
- Metodický pokyn Ministerstva životního prostředí k hodnocení vyluhovatelnosti odpadů částka 12, prosinec 2002.
- Metodický pokyn Ministerstva životního prostředí – Kritéria znečištění zemin a pozemní vody, částka 3, 1996.

## **Ostatní**

- Emailová korespondence s RNDr. Jan Gruntorád, CSc. [online] 16. 1. 2015, Jan.Gruntorad@mzp.cz.

## Vlastní publikace doktorandky

- Motyka, O., Macečková, B., Seidlerová, J. a Krejčí, B. 2015. Environmental factors affecting trace metal accumulation in two moss species. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, ISSN Online: 1844 – 489X. *IN PRESS*.
- Slunská, S. & Macečková, B. 2014. Změna barevných odstínů vybrané Impregnační lazury na dřevěných fasádách způsobená umělým stárnutím. *Construmat 2014: conference about structural materials : [20. mezinárodní konference]: Malenovice, 11.-13.6.2014*, VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014, s. 119-126, ISBN 978-80-248-3381-1.
- Čecháková, K., Motyka, O., Válová, E., Macečková, B. a Stalmachová, B. 2014. Investigation of the influence of nickel in precipitation through the surface properties of moss *Pleurozium schreberi*. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 9(2), S. 153-158. ISSN Online: 1844 – 489X.
- Macečková, B. 2013. Kontaminované domněnky o až tak nekontaminovaném Hrušově. *Brownfieldy – cesta od minulosti do budoucnosti/ Barbara Vojvodíková (eds.)*. European Science And Art Publishing, Praha, 2013. ISBN 978-80-87504-22-2.
- Macečková, B. 2013. Phytoremediation of contaminated soils by *Cannabis sativa* L. *Results and Solutions of Young R & S for Innovations and Progress: [conference proceedings]*, Ostrava : VŠB - Technical University of Ostrava, s. 77 – 80. ISBN: 9788024832920.
- Motyka, O., Macečková, B. a Seidlerová, J. 2013. Indoor biomonitoring of particle related pollution: trace element concentration in an office environment. *NANOCON 2013 : 5th international conference: October 16th-18th 2013, hotel Voroněž I, Brno, Czech Republic, EU: conference proceedings*, s. 691 – 695. ISBN 978-80-87294-44-4.
- Vojkovská, D., Vojvodíková, B. a Macečková, B. 2013. Underused land, brownfields, future use and effects: Browntrans project outputs. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 173, s. 205-216. ISSN 1743-3541; ISBN 978-1-84564-714-8.

Vojvodíková, B., Vojkovská, D. a Macečková, B. 2013. Brownfields in the area of small municipalities. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management*, SGEM 2013, s. 155-160. ISSN 1314-2704; ISBN 978-619-7105-04-9.

Motyka, O., Macečková, B., Seidlerová, J. a Krejčí, B. 2011. Novel technique of active biomonitoring introduced into Czech Republic: Bioaccumulation of atmospheric trace metals in two moss species. *Geoscience Engineering*, 57(3): 30-36, ISSN 1802-5420.

### **Řešené projekty**

2014 - 2015	Škola hrou – Učit se učením, FRVŠ2014/10
2012 - 2014	BROWNTRANS – Leonardo da Vinci 2011-1-SK1-LEO05-02876
2012 - 2014	Partnerství pro české brownfieldy CZ.1.07/2.4.00/17.0033

## Seznam tabulek

Tabulka č. 1: Rozdělení sanačních technologií půd a půdního vzduchu .....	24
Tabulka č. 2: Výhody zavedení fytořemediace pro různé cílové sektory .....	30
Tabulka č. 3: Výhody a nevýhody aplikace technologie fytořemediace, resp. fytoextrakce .....	38
Tabulka č. 4: Výsledek analýzy vodného výluhu odebrané zeminy .....	55
Tabulka č. 5: Porovnání výsledků analýzy vodného výluhu odebrané zeminy s nejvýše přípustnými hodnotami ukazatelů pro jednotlivé třídy vyluhovatelnosti stanovené Vyhláškou č. 294/2005 Sb. ....	56
Tabulka č. 6: Výsledky analýzy vysušeného vzorku odebrané zeminy.....	57
Tabulka č. 7: Nejvýše přípustné koncentrace škodlivin v sušině odpadů pro druhotné využití zeminy při úpravě povrchu terénu.....	58
Tabulka č. 8: Výsledky analýzy výluhu vzorku odebrané zeminy v lučavce královské .....	60
Tabulka č. 9: Kritéria pro stanovení znečištění zeminy stanovená podle Metodického pokynu MŽP – Kritéria znečištění zemin a podzemní vody z roku 1996 .....	61
Tabulka č. 10: Analýza vzorku odebrané zeminy sekvenční extrakcí podle Tessiera .....	63
Tabulka č. 11: Vzorek č. 1 - kořen rostliny rostoucí na kontaminované půdě .....	68
Tabulka č. 12: Vzorek č. 2 - kořen rostliny rostoucí na kontaminované půdě .....	71
Tabulka č. 13: Vzorek č. 1 - stonek rostliny rostoucí na kontaminované půdě .....	73
Tabulka č. 14: Vzorek č. 2 - stonek rostliny rostoucí na kontaminované půdě .....	76
Tabulka č. 15: Vzorek č. 3 - stonek rostliny rostoucí na kontaminované půdě - podélný řez .....	77
Tabulka č. 16: Vzorek č. 1 - semeno rostliny rostoucí na kontaminované půdě .....	80
Tabulka č. 17: Vzorek č. 1 - list rostliny rostoucí na kontaminované půdě.....	83
Tabulka č. 18: Vzorek č. 2 - list rostliny rostoucí na kontrolním substrátu .....	86
Tabulka č. 19: Obsah prvků naměřených v rostlině technického konopí .....	90



## Seznam obrázků

Obrázek č. 1: Bývalé Chemické závody Hrušov, Ostrava – Hrušov – průmyslový brownfield .....	16
Obrázek č. 2: Vojenský brownfield, Osoblaha.....	17
Obrázek č. 3: Zemědělský brownfield v zaniklé obci Studnice.....	17
Obrázek č. 4: Zámek v obci Jindřichov – kulturní brownfield .....	18
Obrázek č. 5: Gymnázium Sándora Petőfiho, Banská Štiavnica (SK) – institucionální brownfield .	18
Obrázek č. 6: Nedostavěný sportovní stadion, Zvolen (SK) – rekreační brownfield .....	19
Obrázek č. 7: Kategorizace BF podle pravděpodobnosti jejich znovuvyužití, překlad J. Bergatt Jackson .....	20
Obrázek č. 8: Funkční mechanismy fytořemediace .....	32
Obrázek č. 9: Rozdíl akumulace kontaminantů u ne-hyperakumulátorů (vlevo) a hyperakumulátorů (vpravo) .....	35
Obrázek č. 10: Psychoaktivní $\Delta^9$ – tetrahydrocannabinol .....	43
Obrázek č. 11: : Nepsychoaktivní kanabidiol .....	43
Obrázek č. 12: Příčný řez stonku technického konopí (vlevo) a netechnického konopí - marihuany (vpravo) .....	44
Obrázek č. 13: Připravené činnosti v rámci předběžného laboratorního experimentu.....	46
Obrázek č. 14: <i>C. sativa</i> L. v zahradnickém substrátu .....	47
Obrázek č. 15: Technické konopí ( <i>Cannabis sativa</i> L.) .....	47
Obrázek č. 16: Uhynulá rostlina technického konopí rostoucí na substrátu „B“ .....	48
Obrázek č. 17: Srovnání vitality rostlin <i>Cannabis sativa</i> L. na všech substrátech.....	48
Obrázek č. 18: Biomasa vypěstovaných rostlin <i>C. Sativa</i> L. ....	49
Obrázek č. 19: Výška rostlin <i>C.sativa</i> L. ....	49
Obrázek č. 20: Výsadba užití plodiny <i>Cannabis sativa</i> L. na pozemcích společnosti AGRITEC, výzkum, šlechtění a služby s. r. o. ....	51
Obrázek č. 21: Schéma do země zapuštěné plastové nádoby pro pěstování konopí .....	51
Obrázek č. 22: Konečná úprava povrchu zeminy při zahájení fytoextrakce .....	52
Obrázek č. 23: Distribuce prvků v rostlině technického konopí.....	88
Obrázek č. 24: Distribuce prvků akumulovaných v rostlině technického konopí .....	93

## Seznam zkratk a značek

### *Seznam českých zkratk*

MŽP	Ministerstvo životního prostředí
S-001	Skládka skupiny S – ostatní odpad

### *Seznam cizojazyčných zkratk*

AAS	Atomová absorpční spektrometrie
AMA 254	Advanced mercury analyser AMA 254 – přístroj pro stanovení rtuti
BAC	Bioakumulační faktor
BFC	Biokoncentrační faktor
BFT	Faktor biologického transferu
CABERNET	Concerted Action on Brownfield and Economic Regeneration Network
CBD	Kanabidiol
EDX	Energo - disperzní mikroanalýza
ICP – AES	Atomová emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem
SEM	Skenovací elektronový mikroskop
TEM	Transmisní elektronový mikroskop
THC	Tetrahydrocannabinol
US EPA	US Environmental Protection Agency
XRFS	Rentgenová fluorescenční spektrometrie